

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES  
DE L'ENVIRONNEMENT

PAR

LUC LAVOIE

GÉOPÉDOLOGIE, FORMATION DES PLAINES ALLUVIALES ET  
RÉCURRENCE DES INONDATIONS – BASSIN CENTRE-SUD DU  
QUÉBEC (CANADA)

AOÛT 2005

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

## REMERCIEMENTS

L'accomplissement de ce travail n'aurait pu être possible sans l'aide, l'implication et le support de plusieurs personnes. Je désire remercier en premier lieu le Dr Diane Saint-Laurent, ma directrice de recherche, pour m'avoir fait confiance dès le début de ce projet. Merci également pour sa disponibilité, ses conseils et son encadrement très minutieux qui m'ont permis de réaliser les objectifs scientifiques établis.

Je souhaite également remercier le Dr Ali Assani et le Dr Stéphane Campeau pour la révision du présent mémoire, ainsi qu'en tant que membres de mon comité d'orientation. Merci pour les commentaires très pertinents et constructifs qui ont permis l'avancement ainsi que la réalisation de ce projet.

J'aimerais remercier MM. François Péloquin et Julien St-Laurent pour leur assistance et leur aide soutenues lors des étés d'échantillonnage et de prise de données sur le terrain. Merci aussi à Pierre-André Bordeleau, tant pour ces nombreux conseils que sa disponibilité. Je tiens aussi à remercier particulièrement M. Jacques Boisvert qui a toujours été à l'écoute et très dévoué pour des conseils de toutes sortes.

Cette recherche a été réalisée grâce aux subventions obtenues par ma directrice de recherche, et nous tenons à remercier tout particulièrement le Conseil de recherches en sciences naturelles et génie du Canada (CRSNG) et les fonds institutionnels de recherches (FIR) de l'UQTR.

Enfin, je tiens à remercier particulièrement ma famille et mes amis, sans qui la réalisation de ce travail n'aurait pas été aussi soutenue et agréable à accomplir. Et Marguerite, ma fille, le plus immense merci pour tout ce qu'elle a su et pu m'apporter.

## AVANT-PROPOS

Le présent document s'inscrit conformément à l'article D45-46-47 du règlement des études de cycles supérieurs selon lequel un travail de recherche effectué dans le cadre d'une maîtrise en Sciences de l'environnement, ainsi que les résultats issus de ce travail peuvent être présentés sous forme d'article scientifique plutôt que sous forme de mémoire traditionnel.

Il a donc été convenu avec ma directrice de recherche, le Dr Diane Saint-Laurent, que deux articles issus de ce projet seront soumis aux revues scientifiques suivantes : *Canadian Journal of Soil Science* et *BELGEO*. Ce document comprend les deux articles (Chapitres II et III), précédé d'un résumé substantiel faisant état d'une brève revue de la littérature. À ce sujet, un article écrit conjointement avec le Dr Saint-Laurent et publié dans le périodique *Revue des Sciences de l'Eau* est présenté dans l'annexe A et comporte une revue exhaustive de la littérature concernant les approches méthodologiques utilisées dans la reconstitution des paléo-inondations. L'annexe B, quant à elle, présente les différentes activités scientifiques auxquelles j'ai participées ou contribué dans différents colloques ou congrès liés à mes travaux de recherche. Les annexes C et D sont les directives aux auteurs relatives aux deux revues scientifiques.

Enfin, il faut noter que ce projet s'inscrit dans un programme de recherche (CRSNG) du Dr Diane Saint-Laurent, visant l'analyse des inondations et paléo-inondations ainsi que les changements climatiques pour les bassins situés au centre-sud du Québec. Ce travail fait partie du deuxième de quatre volets du programme qui concerne la reconstitution des inondations et paléo-inondations (échelles séculaire et millénaire) à partir d'indicateurs paléoenvironnementaux (sols, sédimentologie, datation  $^{14}\text{C}$ , etc.).

## TABLE DES MATIÈRES

	Pages
REMERCIEMENTS .....	II
AVANT-PROPOS .....	III
TABLE DES MATIÈRES .....	IV
LISTE DES FIGURES .....	VI
LISTE DES TABLEAUX .....	VIII
LISTE DES ANNEXES .....	IX
<b>CHAPITRE I</b> .....	<b>1</b>
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
PROBLÉMATIQUE ET REVUE DE LA LITTÉRATURE .....	1
RÉSULTATS.....	7
<i>Sols et paléosols des plaines</i> .....	7
<i>Taux sédimentaire et édification des plaines</i> .....	8
<i>Réurrence des inondations</i> .....	10
CONCLUSION.....	11
RÉFÉRENCES DE L'INTRODUCTION GÉNÉRALE .....	13
<b>CHAPITRE II</b> .....	<b>19</b>
ANALYSE DES SOLS ET PALÉOSOLS EN PLAINE ALLUVIALE ET TAUX DE SÉDIMENTATION .....	19
RÉSUMÉ .....	20
ABSTRACT .....	21
INTRODUCTION .....	22
MÉTHODES .....	24
RÉSULTATS .....	28
<i>Secteur Saint-Nicéphore (SNI)</i> .....	29
<i>Secteur Richmond-Windsor (RIC-WIN)</i> .....	30
<i>Secteur Massawippi (MAS)</i> .....	31
<i>Secteur Eaton (EAT)</i> .....	32
DISCUSSION .....	34

	Pages
DÉVELOPPEMENT DES SOLS EN PLAINE .....	34
ÉDIFICATION DES PLAINES ET SÉDIMENTATION .....	36
CONCLUSION.....	39
REMERCIEMENTS .....	40
RÉFÉRENCES .....	41
<b>CHAPITRE III</b> .....	<b>58</b>
ÉDIFICATION DES PLAINES ALLUVIALES ET RÉCURRENCE DES INONDATIONS DES BASSINS DU CENTRE-SUD DU QUÉBEC (CANADA) .....	58
Résumé .....	59
ABSTRACT .....	60
INTRODUCTION .....	61
LOCALISATION ET SECTEURS D'ÉTUDE .....	63
MÉTHODES .....	64
ÉCHANTILLONNAGE ET DESCRIPTION MORPHOLOGIQUE DES SOLS.....	64
ANALYSES PHYSICO-CHIMIQUES ET DATATION RADIOCARBONE .....	65
SOURCE DES DONNÉES HISTORIQUES D'INONDATION ET SÉRIES HYDROLOGIQUES .....	66
RÉSULTATS ET DISCUSSIONS .....	67
SOLS ET PALÉOSOLS DES PLAINES.....	67
COMPOSITION TEXTURALE ET TAUX SÉDIMENTAIRE .....	69
RÉCURRENCE DES INONDATIONS ET ÉDIFICATION DES PLAINES.....	71
CONCLUSION.....	73
REMERCIEMENTS .....	74
RÉFÉRENCES .....	76
ANNEXES .....	101

## LISTE DES FIGURES

	Pages
<b>Figure 2.1</b>	Localisation des stations d'échantillonnage et d'observation dans les différents secteurs d'étude (SNI, RIC-WIN, MAS et EAT). Les profils contenant des couches contaminées sont aussi indiqués. .... 48
<b>Figure 2.2</b>	Plaine typique des plaines alluviales de la rivière Saint-François (secteur RIC-WIN). On peut voir l'accumulation récente des sédiments de crues (1,5 à 3,5 cm) déposés lors d'une crue printanière (05/05/2003). .... 49
<b>Figure 2.3</b>	Exemple d'un profil de sol typique localisé dans le secteur Eaton Nord (EAT 8a). On peut noter la forte homogénéité des sédiments de crues et aussi la présence d'horizons organiques discontinus. .... 51
<b>Figure 2.4</b>	Représentation schématique des profils de sols des stations d'échantillonnage (secteurs SNI et RIC-WIN). .... 53
<b>Figure 2.5</b>	Représentation schématique des profils de sols des stations d'échantillonnage (secteurs RIC-WIN, MAS et EAT). .... 55
<b>Figure 2.6</b>	Profils des sols et paléosols localisés dans les différents secteurs d'étude (A: secteur SNI; B: RIC-WIN; C: MAS; D: EAT). .... 56
<b>Figure 2.7</b>	Schéma des profils de sols montrant l'accumulation des sédiments de crues sus-jacents les couches contaminées aux hydrocarbures C <sub>10</sub> -C <sub>50</sub> . .... 57
<b>Figure 3.1</b>	Carte des dépôts de surface des secteurs Saint-Nicéphore (SNI) et Richmond-Windsor (RIC- WIN). .... 88
<b>Figure 3.2</b>	Carte des dépôts de surface des secteurs Massawippi (MAS) et Eaton (EAT). .... 89

<b>Figure 3.3</b>	Localisation des stations d'échantillonnage et d'observation dans les secteurs Saint-Nicéphore (SNI) et Richmond-Windsor (RIC-WIN).....	90
<b>Figure 3.4</b>	Localisation des stations d'échantillonnage et d'observation dans les secteurs Massawippi (MAS) et Eaton (EAT). ....	91
<b>Figure 3.5</b>	Représentation schématique des sols et paléosols des plaines des différents secteurs.....	93
<b>Figure 3.6</b>	Diagramme des classes texturales des profils de sol analysés dans les secteurs RIC-WIN, MAS et EAT. ....	94
<b>Figure 3.7</b>	Exemple typique d'un profil de sol dans le secteur Eaton (station EAT-8a). La partie supérieure (0-80 cm) du profil est caractérisée par une matrice texturale fine et par un faible développement pédogénétique. ....	96
<b>Figure 3.8</b>	Courbe des débits moyens annuels mesurés dans les différents secteurs d'étude. ....	97
<b>Figure 3.9</b>	Courbe des débits maximums journaliers mesurés dans les différents secteurs d'étude.....	98
<b>Figure 3.10</b>	Limons de crues déposés sur le replat d'une plaine alluviale dans le secteur de Windsor au printemps 2003. L'accumulation mesurée est de l'ordre de 1,5 à 3,5 cm à cet emplacement.....	99
<b>Figure 3.11</b>	Photographie montrant les amas de feuilles et brindilles accrochés aux branches des arbres après une crue (printemps 2003). Le niveau atteint par les eaux de la rivière Massawippi dépassait plus de deux mètres du niveau moyen.....	100



## LISTE DES TABLEAUX

	Pages
<b>Tableau 2.1</b> Composition texturale et analyses chimiques des échantillons de sols à différentes stations.....	45
<b>Tableau 2.2</b> Composition texturale et nature des dépôts meubles des stations d'observation. ....	46
<b>Tableau 2.3</b> Évaluation des taux de sédimentation pour les différents secteurs d'étude.....	47
<b>Tableau 3.1</b> Nature des dépôts de surface et leur répartition par secteurs d'étude (SNI, RIC-WIN, MAS et EAT). ....	81
<b>Tableau 3.2</b> Macrorestes identifiés dans les horizons organiques des paléosols des plaines alluviales. ....	82
<b>Tableau 3.3</b> Analyses physico-chimiques des horizons de sols aux stations d'échantillonnage.....	83
<b>Tableau 3.4</b> Composition texturale des sédiments de surface aux stations d'observation. ....	84
<b>Tableau 3.5</b> Datations radiocarbone, couches contaminées (C <sub>10</sub> -C <sub>50</sub> ) et évaluation des taux de sédimentation des plaines alluviales. ....	85
<b>Tableau 3.6</b> Événements d'inondation recensés dans les secteurs SNI et EAT.....	86
<b>Tableau 3.7</b> Évaluation du taux sédimentaire à partir de la fréquence des inondations.....	87

## CHAPITRE I

### INTRODUCTION GÉNÉRALE

#### Problématique et revue de la littérature

Depuis les deux dernières décennies, les changements climatiques globaux anticipés ont suscité beaucoup d'intérêts dans la communauté scientifique, notamment par des travaux portant sur les différents impacts reliés à ce phénomène global. Dans ce contexte, les travaux menés dans différentes régions du monde ont permis de constater que les changements climatiques associés au réchauffement planétaire se manifesteraient possiblement par une recrudescence des événements extrêmes, tels les pluies diluviennes, les ouragans et les inondations. Les conséquences de ces changements pourraient s'observer à travers les différents écosystèmes, tant au niveau terrestre qu'aquatique.

Les travaux visant à comprendre les impacts de ces changements touchent différents champs d'études, dont la géomorphologie, l'écologie et l'hydrologie. Dans le domaine de l'hydrologie, les recherches ont porté principalement sur les relations entre les changements climatiques et les variations des régimes hydrologiques des rivières ou cours d'eau, en utilisant les bases de données hydrologiques et climatiques recensées sur des échelles décennales. En se référant à des échelles chronologiques séculaires ( $\approx 150$  ans), il devient intéressant de déterminer dans quelle mesure les événements extrêmes sont en partie liés aux changements climatiques et/ou aux facteurs anthropiques (déboisement, endiguement, etc.). Pour mieux discerner les variations climatiques et leurs effets sur les systèmes fluviaux, certains chercheurs se sont attardés à utiliser des échelles chronologiques plus longues, dont l'échelle du millénaire (Knox, 1985; Baker *et al.*, 1993; Ely *et al.*, 1993;

Brown *et al.*, 2000; Greenbaum *et al.*, 2000). Ainsi, avec l'intérêt grandissant pour les études en paléohydrologie, et plus particulièrement sur les paléo-inondations, les chercheurs tentent de mieux comprendre l'impact des changements climatiques sur les régimes fluviaux pour des échelles de longue durée. En somme, ils cherchent à établir les liens entre les variations climatiques et les événements extrêmes en se basant sur la chronologie des inondations récentes et anciennes (paléo-inondations).

On peut constater un intérêt nouveau des études portant sur les variations des régimes hydrologiques et les récurrences<sup>1</sup> des inondations et paléo-inondations (séculaire/millénaire). D'ailleurs, dans un travail récent réalisé par Saint-Laurent et Lavoie (2004), on présente une revue détaillée de la littérature concernant les différentes approches méthodologiques utilisées dans l'étude des paléo-inondations. (Cette revue est présentée dans l'annexe A du présent mémoire). Il s'agit d'un compte-rendu des principaux travaux réalisés dans ce domaine et leurs applications méthodologiques. Entre autres, la revue présente les différents indicateurs biophysiques utilisés dans la reconstitution des paléo-inondations, telles que l'analyse des séquences stratigraphiques et sédimentaires, la dendrochronologie, l'analyse des macrorestes et la méthode de datation radiocarbone (<sup>14</sup>C).

Les études intéressées à comprendre les environnements fluviaux et les processus naturels qui modifient progressivement la morphologie des cours d'eau remontent au début du siècle dernier avec les travaux du naturaliste suisse L. Agassiz (1838). Ces travaux pionniers ont par la suite été repris par J. D. Dana (1882) et J. H. Bretz (1923). En fait, ces chercheurs tentaient de comprendre la mise en place des dépôts à partir de l'analyse des séquences stratigraphiques, lesquelles étaient associées à des événements d'inondations majeures. Les recherches portant sur les processus hydrologiques et

---

<sup>1</sup> Le terme récurrence peut se définir comme le « moment » où un événement se produit lors de conditions d'eau particulières et pouvant être déterminant dans les processus de certains cycle vitaux (Richter *et al.*, 1996).

géomorphologiques, qui modifient le développement des plaines alluviales<sup>2</sup>, remontent à plus de 30 ans avec des études réalisées dans différentes régions du monde (Wolman et Leopold, 1957; McKee *et al.*, 1967; Ritter *et al.*, 1973; Costa, 1978; Scully et Arnold, 1981; Krauss et Bown, 1986; Komar, 1988; Williams et Costa, 1988; Magilligan, 1992; Anderson *et al.*, 1996; Aslan et Autin, 1998; Taylor et Brewer, 2001; Brooks, 2002; Oetelaar, 2002).

Plus spécifiquement, les travaux portant sur l'étude des paléo-inondations ont été réalisés essentiellement dans des environnements climatiques arides ou semi-arides, comme les régions du sud et sud-ouest américain, de l'Australie et de l'Afrique (Enzel *et al.*, 1993; Chatters et Hoover, 1994; O'Connor *et al.*, 1994; Zawada et Hattingh, 1994; Ely, 1997; Baker, 2000; Heine et Heine, 2002; Ostenna *et al.*, 2002; Webb *et al.*, 2002). On compte aussi quelques études réalisées dans des climats humides ou sub-humides comme au Japon, en Inde et en Chine (Ely *et al.*, 1996; Yang *et al.*, 2000; Grossman, 2001; Jones *et al.*, 2001), ainsi que dans des régions tempérées ou froides, comme en Europe et au Canada (Macklin *et al.*, 1992; Benito *et al.*, 1998; Livingston *et al.*, 2001; Arnaud-Fassetta, 2002; Saint-Laurent et Lavoie, 2003; Saint-Laurent et Saucet, 2003). Ces travaux cherchent à établir la chronologie des événements d'inondation sur plusieurs siècles ou sur plusieurs millénaires (période holocène).

La reconstitution des séquences chronologiques des anciennes inondations peut entraîner de nombreuses difficultés. Les indices biophysiques permettant de reconstituer les anciens environnements fluviaux peuvent s'atténuer, ou partiellement disparaître, rendant difficile leur reconstitution. Les changements des conditions climatiques sont un autre facteur à considérer dans l'interprétation des conditions du passé. Ces difficultés rencontrées amènent les

---

<sup>2</sup> Plaine d'inondation normale d'un cours d'eau. Il s'agit d'une forme de plaine ayant une pente relativement faible qui se retrouve en plaine d'inondation suite à des dépôts importants d'alluvions lorsque les berges d'un cours d'eau sont inondées de façon périodique (Baker *et al.* 1988).

chercheurs à utiliser différentes approches disciplinaires qui impliquent l'utilisation de diverses méthodes d'analyses et de techniques de travail.

Plusieurs indicateurs sont couramment utilisés dans la reconstitution chronologique des paléo-inondations. On retrouve en effet différentes méthodes, telles que l'analyse des séquences stratigraphiques et sédimentaires, et les analyses pédologiques. Les méthodes de datation radiocarbone et isotopique, ou de thermoluminescence et de dendrochronologie, ainsi que la lichenométrie sont aussi utilisées dans la reconstitution des paléo-inondations. La datation radiocarbone ( $^{14}\text{C}$ ) est de loin la méthode la plus utilisée afin d'établir la chronologie des inondations (Baker *et al.*, 1985; Chatters et Hoover, 1986; Ely *et al.*, 1992; Waythomas et Jarrett, 1994; Ely, 1997; Jones *et al.*, 2001; Heine et Heine, 2002; Ostenaar *et al.*, 2002). L'utilisation de cette méthode permet de dater des événements sur des échelles chronologiques relativement récentes, soit entre  $\pm 20\ 000$  et 100 ans BP (Mahaney, 1998). Cependant, la difficulté majeure relevant de cette technique est de pouvoir trouver des horizons organiques dans les séquences sédimentaires. Ce problème se rencontre régulièrement, tant dans les climats arides et semi-arides (Chatters et Hoover, 1994; O'Connor *et al.*, 1994; Ely, 1997; Heine et Heine, 2002; Ostenaar *et al.*, 2002; Webb *et al.*, 2002), que dans les régions humides (Knox, 2000; Yang *et al.*, 2000; Grossman, 2001; Jones *et al.*, 2001). Souvent l'absence de matière organique dans les sédiments s'explique par une période trop courte entre les phases d'inondation, permettant difficilement l'établissement d'une couverture végétale dense, ou encore l'absence d'horizons organiques enfouis peut s'expliquer par l'action de processus naturels (érosion fluviale, ruissellement, etc.).

Les apports sédimentaires et les différents processus qui s'opèrent lors des crues majeures sont des phénomènes de plus en plus étudiés, et ce dans le but de comprendre le contexte géomorphologique et pédologique de tels événements (Anderson *et al.*, 1996; Autin *et al.*, 1998; Brooks, 2002; Oetelaar,

2002; Ostenaa *et al.*, 2002; Daniels, 2003). D'autre part, plusieurs travaux s'intéressent plus particulièrement à la géomorphologie et à la stratigraphie en milieu fluvial (Costa, 1978; Scully et Arnold, 1981; Kochel et Baker *et al.*, 1988; Komar, 1988; Klawon *et al.*, 2000). Bien qu'il existe différentes approches méthodologiques pour l'étude des inondations récentes et anciennes (Jacobson *et al.*, 2003; Saint-Laurent, 2004; Saint-Laurent et Lavoie, 2004), certains chercheurs se sont intéressés plus particulièrement aux processus de sédimentation et d'érosion affectant les sols des plaines alluviales (Magilligan, 1992; Martin, 1992; Brooks, 2002; Daniels, 2003). En considérant les travaux réalisés en milieu fluvial, on se rend compte que très peu se sont intéressés concrètement au processus d'édification des plaines alluviales dans un contexte où les inondations sont fréquentes, tout au moins au Québec et au Canada. La dynamique fluviale associée aux inondations fréquentes entraîne des modifications importantes au niveau des plaines alluviales. Il nous est apparu intéressant de mieux comprendre les processus engendrés par ces phénomènes dans le bassin de la rivière Saint-François, lequel bassin est largement affecté par les inondations (Saint-Laurent *et al.*, 2001). Ainsi, l'objectif principal de cette étude visait principalement la reconstitution chronologique des inondations et des paléo-inondations sur le bassin de la rivière Saint-François pour des échelles séculaire et millénaire par la méthode de datation  $^{14}\text{C}$ . Cependant, après des analyses préliminaires issues d'une première campagne de terrain, cet objectif a été en partie modifié, en raison de l'absence de datation très ancienne des paléosols des plaines (soit la période holocène). En effet, les plaines de l'ensemble du bassin sont des plaines très jeunes et les horizons organiques enfouis dans les sédiments associés aux événements de crues fournissent des datations récentes. Par ailleurs, la rareté des horizons organiques a fait en sorte qu'il nous a été difficile d'établir une chronologie très détaillée des inondations à partir de ces indicateurs. Ainsi, une partie des objectifs de départ ont été modifiés. Nous les présentons donc ci-dessous :

- Étudier la dynamique des plaines alluviales et le développement pédogénétique des sols soumis à des crues fréquentes ;
- Étudier conjointement l'analyse des sols alluviaux et la formation des plaines alluviales afin de mieux comprendre l'évolution des sols associés à la dynamique fluviale de cette région.

Les objectifs spécifiques sont les suivants :

- Étudier les sols des plaines alluviales (morphologie et processus de pédogénèse) par des analyses morphologiques et physico-chimiques, afin d'évaluer leur développement pédogénétique;
- Mesurer les taux de sédimentation des plaines par des analyses sédimentologiques et par la chronologie radiocarbone;
- Utiliser les données de fréquence<sup>3</sup> d'inondation dans l'étude des plaines alluviales afin d'évaluer les taux sédimentaires.

Les plaines alluviales des secteurs d'étude soumises à des inondations fréquentes sont caractérisées par des dépôts relativement fins mis en place lors des débordements et ces apports sédimentaires façonnent les plaines de façon continue. Par ailleurs, le couvert végétal est relativement réduit, ce qui se traduit par des sols pauvres qui s'expliquent par les litières très minces et diminuent l'apport organique dans ce type de sol (Birkeland, 1999). La formation de ces plaines et les processus fluviaux qui y sont associés sont analysés en considérant les caractéristiques sédimentologiques des faciès représentant souvent plusieurs décennies d'accumulation. Les paléosols formés lors de l'édification des plaines et l'évolution pédogénétique des sols et paléosols sont aussi considérés dans l'analyse des plaines alluviales (Ritter *et al.*, 1973; Krauss et Bown, 1986; Williams et Costa, 1988; Taylor et Brewer, 2001; Daniels, 2003).

---

<sup>3</sup> La fréquence ou la présence de conditions hydrologiques spécifiques comme des sécheresses ou inondations peuvent être souvent associées à des événements de reproduction ou de mortalité de diverses espèces influençant la dynamique des populations (Richter *et al.*, 1996).

## Résultats

### *Sols et paléosols des plaines alluviales*

Pour l'ensemble des stations d'échantillonnage, les sols en surface ont été classés parmi les régosols orthiques et les régosols gleyifiés, à l'exception d'un sol classé comme brunisol dystrique orthique (Figures 2.4 et 2.5). Sur le plan morphologique et pédogénétique, ces sols sont considérés comme jeunes et peu développés. Ils sont pour la majorité caractérisés par l'absence d'horizons organo-minéraux (Ah) et d'horizons d'accumulation (B). L'absence de ces horizons s'explique particulièrement par l'âge des sols et par la quasi-absence de biomasse en surface. Le niveau d'altération chimique de ces sols est aussi très faible avec des taux de sesquioxydes d'aluminium (Al) et de fer (Fe) dont la valeur moyenne est de l'ordre de 0,45% (Tableau 3.3). Les taux de carbone organique total (C.O.%) sont aussi peu élevés avec une valeur moyenne de 1,55% pour l'ensemble des profils analysés. Et enfin, le pH varie très légèrement de la surface en profondeur avec une valeur moyenne de 5,44.

Les paléosols observés dans les différents secteurs d'étude ont été classés parmi les régosols cumuliques, les régosols cumuliques gleyifiés et les brunisols dystriques gleyifiés (Figures 2.4 et 2.5). Ils ont des caractéristiques semblables à ceux des sols de surface décrit précédemment. Par ailleurs, ils renferment un ou deux horizons organiques (O). Ces horizons O correspondent vraisemblablement à des accumulations liées au transport fluvial. On croit en effet que l'établissement de ces horizons organiques s'est fait par le transport fluvial lors des inondations (débris organiques sur le replat des plaines et enfouissement par les crues successives). Ceci expliquerait que les datations  $^{14}\text{C}$  sont relativement jeunes. En effet, les dates  $^{14}\text{C}$  obtenues varient entre un âge moderne et  $200 \pm 60$  BP dans le cours moyen de la rivière Saint François et entre  $30 \pm 70$  BP et  $440 \pm 80$  BP dans le secteur Eaton, à



l'exception d'un profil renfermant un lit organique qui a donné un âge  $^{14}\text{C}$  de  $2210 \pm 60$  BP (Figure 2.5). Cet horizon correspond très certainement à un ancien niveau de terrasse.

### *Taux sédimentaire et édification des plaines alluviales*

Les plaines alluviales analysées sont caractérisées par des sédiments fins qui sont caractéristiques des dépôts de crues (Baker, 1987). On constate que les sédiments ont une matrice très uniforme pour l'ensemble des profils des différents secteurs (Tableau 3.3). Les alluvions analysées ont des classes texturales qui varient principalement des limons sableux fins à très fins. On trouve aussi des sables limoneux et des sables limoneux fins. Pour certains des profils, on a pu observer à quelques occasions des classes granulométriques plus grossières à la base des profils, tels des sables grossiers et des lits de graviers dans quelques cas. Il s'agit fort probablement de changements dans le régime d'écoulement fluvial lors de l'édification des plaines alluviales.

Les taux de sédimentation ont pu être évalués à partir des datations  $^{14}\text{C}$  et en fonction des accumulations de sédiments. Les secteurs où les apports alluvionnaires sont importants sont aussi soumis à des phases d'érosion qui rend l'évaluation du bilan accumulation/érosion moins précise. On peut considérer toutefois que les plaines alluviales sont des milieux plus propices à l'accumulation qu'à l'érosion (Anderson *et al.*, 1996; Daniels, 2003). Dans le secteur Saint-Nicéphore, on constate la présence de limons sableux fins et de sables limoneux fins à très fins jusqu'à plus de 150 cm de profondeur. Les horizons organiques qui ont permis d'estimer les taux de sédimentation se situent à des profondeurs variant de 84 à 124 cm. Le taux sédimentaire évalué dans ce secteur varie entre 0,68 et 0,93  $\text{cm a}^{-1}$  (Tableau 3.5). Dans le secteur Richmond-Windsor, les sédiments fins, surtout des limons sableux fins à très fins, peuvent atteindre plus de 150 cm d'épaisseur. Les apports sédimentaires évalués à partir de l'épaisseur de sédiments accumulés au-dessus des horizons

organiques indiquent des taux moyens de l'ordre de 0,57 à 3,55, cm a<sup>-1</sup> (Tableau 3.5).

Les sols du secteur Massawippi est caractérisé par des variations texturales relativement très faibles variant entre des limons et des limons sableux très fins. Ces sédiments fins sont présents jusqu'à plus de 150 cm d'épaisseur dans les berges de ce secteur. Aucun horizon organique n'a été trouvé dans les profils de ce secteur, mais des sédiments contaminés par des hydrocarbures (C<sub>10</sub>-C<sub>50</sub>) étaient présents dans les plaines et se retrouvent sous 90 cm de dépôts fins. Ces sédiments sont d'ailleurs l'objet de travaux en cours (Saint-Laurent et St-Laurent, 2004) et l'évaluation faite par les auteurs concernant la date des événements associés à cette contamination indiquerait possiblement l'année 1955. Si la date s'avère exacte, il est possible d'évaluer un taux sédimentaire se situant entre 1,84 et 2,53 cm a<sup>-1</sup> pour ce secteur.

Enfin, dans le secteur Eaton, les plaines alluviales sont surtout constituées de sédiments fins, principalement composés de sables limoneux et de limons sableux fins. Ces dépôts atteignent plus de 150 cm à certains endroits. L'évaluation des taux de sédimentation à partir des datations <sup>14</sup>C et de l'épaisseur des sédiments fournit des valeurs variant entre 0,09 et 1,06 cm a<sup>-1</sup> pour ce secteur (Tableau 3.5).

Les taux sédimentaires calculés à partir des dépôts des plaines alluviales sont représentatif de la majeure partie des secteurs. L'analyse des dépôts de surface montre que les plaines alluviales sont caractérisées par plus de 40,0% de dépôts fluvatile et fluvio-glaciaire (Tableau 3.1). Les terres agricoles caractérisant certains secteurs du bassin entraînent, par le réseau de drainage, des apports sédimentaires alimentent le cours d'eau principal. Ces sédiments peuvent être remobilisés lors des crues et déposés le long des berges.

### *Récurrence des inondations*

La récurrence des inondations dans le bassin de la rivière Saint-François a été l'objet d'études récentes démontrant que la fréquence de ce phénomène est en hausse, en particulier entre les années 1970 et 1990 (Saint-Laurent et Lavoie, 2003; Saint-Laurent et Saucet, 2003; Saint-Laurent *et al.*, 2004). Selon les données hydrologiques compilées à partir de la base de données d'Environnement Canada (Hydat, CD-R 2002) et du Centre d'expertise hydrique du Québec (CEHQ), on remarque une variation inter-annuelle importante des débits des rivières du bassin centre-sud depuis un siècle (Figure 3.8 et 3.9). Les années de forte hydraulité correspondent essentiellement aux années d'inondations importantes.

On peut noter que certains tronçons fluviaux sont plus affectés par les inondations que d'autres. On dénombre par exemple 47 et 42 inondations pour les secteurs Richmond-Windsor et Massawippi respectivement, entre les années 1864 et 2004. Ces secteurs sont caractérisés par un réseau de drainage plus dense et leur bassin hydrographique est de superficie plus importante, en comparaison aux autres secteurs. Notons aussi que le développement urbain et résidentiel dans ces secteurs exerce un impact qui contribue possiblement à une augmentation du ruissellement de surface, ce qui entraîne vraisemblablement une aggravation des inondations. Ces secteurs sont aussi caractérisés par des tronçons de rivières peu encaissés, entraînant plus facilement le débordement lors des crues.

À partir des données de fréquence d'inondation des différents secteurs et l'accumulation de sédiments, on a tenté d'évaluer les taux sédimentaires en tenant compte des âges calendriers couvrant la période historique de 1864 à 2004. Les taux obtenus varient entre 3,33 et 5,22, cm par événement d'inondation (Tableau 3.7). Bien que ces données ne tiennent pas compte de

l'érosion fluviale et de l'ampleur<sup>4</sup> des inondations, on peut reconnaître que les apports alluvionnaires sont nettement plus importants que les pertes dans les zones d'alluvionnement. Il est donc possible de présumer que lors de chaque débordement, il y a une accumulation sédimentaire de l'ordre de 3 à 6 cm selon l'ampleur de la crue et selon les secteurs. Ces taux se comparent aux accumulations observées sur le terrain lors des campagnes d'échantillonnage. En effet, au printemps 2003 et à l'automne 2004, nous avons observé des dépôts sédimentaires récents provenant de ces deux débordements sur le replat des plaines. Les accumulations variaient de 1,5 à 3,5 cm en moyenne pour chacun des débordements (Figure 3.10).

### Conclusion

Les processus d'édification des plaines alluviales dans le bassin du centre-sud du Québec s'expliquent par la fréquence élevée des inondations. Les différents secteurs (SNI, RIC-WIN, MAS et EAT) sont caractérisés par un apport important d'alluvions. Ces sédiments de crues sont présents dans l'ensemble des secteurs riverains des différentes rivières (Saint-François, Massawippi, Eaton). L'une des caractéristiques dominantes des faciès observés est l'uniformité des classes texturales, composées surtout de limons fins à très fins et de limons sableux.

Le développement pédogénétique des sols des plaines alluviales étudiées est relativement réduit par l'apport récurrent de sédiments. Ceci s'observe par l'absence de litière ou d'une couverture végétale dense, ce qui se traduit par des concentrations réduites en matière organique dans le solum. Les types de sols observés se classent parmi les régosols en grande majorité, tandis que

---

<sup>4</sup> L'ampleur (ou magnitude) des conditions hydrologiques est une mesure de la disponibilité des habitats et définit des caractéristiques particulières de ceux-ci comme les terres humides, le volume d'habitat disponible ou encore la position de la nappe d'eau relativement à la végétation de la zone riparienne (Richter *et al.* 1996).

quelques-uns sont classés parmi les brunisols, soit des sols très peu évolués dans l'ensemble. D'ailleurs, les teneurs en sesquioxydes d'Al et de Fe sont très faibles en général. Les datations  $^{14}\text{C}$  obtenues révèlent que l'âge des paléosols en plaine alluviale varie entre  $70 \pm 60$  BP et  $200 \pm 60$  BP pour les secteurs SNI et RIC-WIN et entre  $30 \pm 70$  BP et  $2210 \pm 60$  BP pour le secteur EAT. Les sols des différents secteurs ont des âges très variables, bien que l'évolution pédogénétique des sols en surface demeure sensiblement la même pour tous les profils analysés.

La récurrence des crues apparaît comme un phénomène important dans le cours moyen du bassin Saint-François. Les taux de sédimentation évalués à partir de différents paramètres ( $^{14}\text{C}$ /âge calendrier, épaisseurs des alluvions, récurrence des inondations) fournissent des valeurs moyennes situées entre 3,60 à 6,41 cm d'épaisseur par événement d'inondation, selon les secteurs d'étude. Il s'agit de données relatives qui ne tiennent pas compte toutefois des processus d'érosion fluviale, ni de l'amplitude des inondations. Enfin, les travaux en cours concernant les couches contaminées observées dans les secteurs MAS et SNI pourront éventuellement permettre d'obtenir des données plus précises sur l'édification des plaines et la vitesse de sédimentation dans ces secteurs. Aussi, des travaux ultérieurs pourraient être envisagés dans le but de mieux caractériser les variations saisonnières et interannuelles des débits en relation avec le bilan sédimentaire (érosion/sédimentation) des plaines alluviales.

### Références de l'introduction générale

- Agassiz, L., 1838.** Upon glaciers, moraines, and erratic blocks. *Edinburg New Philosophy Journal*, 24, 364.
- Anderson, M.G., Walling, D.E. et Bates, P.D. 1996.** Flood-plain Processes. Wiley, Chichester, 658 p.
- Arnaud-Fassetta, G., 2002.** Geomorphological records of a "flood-dominated regime" in the Rhône Delta (France) between the 1<sup>st</sup> century BC and the 2<sup>nd</sup> century AD. What correlations with the catchment paleohydrology? *Geodinamica Acta* 15, 79-92.
- Aslan, A. et Autin, W.J. 1998.** Holocene flood-plain soil formation in the southern lower Mississippi Valley : implications for interpreting alluvial paleosols. *Geological Society of America Bulletin*, 110: 433-449.
- Autin, W. J., Aslan A., Bettis E.A. et Walthall, P.M. 1998.** Report from working group on alluvial pedogenesis. *Quaternary International*, 51/52: 85-86.
- Baker, V.R. 1987.** Paleoflood hydrology and extraordinary flood events. *Journal of hydrology*, 96: 79-99.
- Baker, V.R., 2000.** Paleoflood hydrology and the estimation of extreme floods. In: «Inland flood hazards», WOHL E.E. [Ed], pp. 359-377.
- Baker, V.R., Pickup, G., Polach, H.A., 1985.** Radiocarbon dating of flood events, Katherine Gorge, northern Territory, Australia. *Geology*, 13, 344-347.
- Baker, V.R., Kochel R.C. et Patton P.C. 1988.** Flood geomorphology, Wiley (Wiley-Interscience Publication), New York. USA.
- Baker V.R., Benito G., Rudoy A.N., 1993.** Paleohydrology of Late Pleistocene Superflooding, Altay Mountains, Siberia. *Science*, 259, 348-350.
- Benito, G., Machado, M. J., Perez-Gonzalez, A., Sopena, A., 1998.** Paleoflood hydrology of the Tagus River, central Spain. In: «Palaeohydrology and Environmental Change», BENITO G., BAKER V.R. and GREGORY K.J. [Eds], 317-333.

- Birkeland, P.W. 1999.** Soils and geomorphology. Oxford University Press, Oxford, 372 p.
- Bravard, J-P. et Petit, F. 1997.** Les cours d'eau. Dynamique du système fluvial. Masson & Armand Colin, Paris, 222p.
- Bretz, J.H., 1923.** The channelled scablands of the Columbia Plateau. Journal of Geology, 33, 97.
- Brooks, G.R. 2002.** Floodplain chronology and vertical sedimentation rates along the Red River, southern Manitoba. Géographie physique et Quaternaire, 56: 171-180.
- Brown S.L., Bierman P.R., Lini A., Southon J., 2000.** 10 000yr record of extreme hydrologic events. Geology, 28(4), 335-338.
- Chatters, J.C., Hoover, K.A., 1994.** Response of the Columbia River fluvial system to Holocene climatic change. Quaternary Research, 37, 42-59.
- Costa, J.E. 1978.** Holocene stratigraphy in flood frequency analysis. Water Resources Research, 14: 626-632.
- Dana, J.D., 1882.** The flood of the Connecticut River Valley from the melting of the Quaternary glacier. American Journal of Science (parts 1 & 2), 123, 87-179.
- Daniels, J.M. 2003.** Floodplain aggradation and pedogenesis in a semiarid environment. Geomorphology, 56: 225-242.
- Ely, L.L., 1997.** Response of extreme floods in the southwestern United States to climatic variations in the late Holocene. Geomorphology, 19, 175-201.
- Ely, L. L., Webb, R. H., Enzel, Y., 1992.** Accuracy of post-bomb  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{14}\text{C}$  in dating fluvial deposits. Quaternary Research, 38, 196-204.
- Ely, L. L., Enzel, Y., Baker, V.R. et Cayan, D.R. 1993.** A 5000-Year Record of Extreme Floods and Climate Change in the Southwestern United States. Science, 262: 410-412.
- Ely, L.L., Enzel, Y., Baker, V.R., Kale, V.S., Mishra,, S., 1996.** Changes in the magnitude and frequency of late Holocene monsoon floods on the Narmada River, central India. Geological Society of America Bulletin, 108, 1134-1148.
- Environnement Canada, 2002,** Hydat CD-R. (Données hydrologiques).

- Enzel, Y., Ely L.L., Baker V.R., House, P.K., Webb, R.H., 1993.** Paleoflood evidence for a natural upper bound to flood magnitudes in the Colorado River Basin. *Water Resources Research*, 29, 2287-2297.
- Greenbaum N., Schick A.P., Baker V.R., 2000.** The Palaeoflood Record of a Hyperarid Catchment, Nahal Zin, Negev Desert, Israel. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25, 951-971
- Grossman, M.J., 2001.** Large floods and climatic change during the Holocene on the Ara River, Central Japan. *Geomorphology*, 39, 21-37.
- Heine, K., Heine, J.T., 2002.** A paleohydrologic reinterpretation of the Homeb Silts, Kuiseb River, central Namib Desert (Namibia) and paleoclimatic implications. *Catena*, 48, 107-130.
- Jacobson R. B., O'Connor J. E. et Oguchi T. 2003.** Surficial geologic tools in fluvial geomorphology. Pages 25-57 dans G. M. Kondolf et H. Piégay, eds. *Tools in fluvial geomorphology*. J. Wiley, Chichester, U.K.
- Jones, A.P., Shimazu, H., Oguchi, T., Okuno, M., Tokutake, M., 2001.** Late Holocene slackwater deposits on the Nakagawa River, Tochigi Prefecture, Japan. *Geomorphology*, 39, 39-51.
- Klawon, J.E., Levish, D.R. et O'Connell, D.R.H. 2000.** Paleofloods and paleosols on the north Platte River. Stratigraphic records of exceedance and nonexceedance. *Geological society of America, Abstract*, 32: A-509.
- Knox, J.C., 1985.** Responses of Floods to Holocene Climatic Change in the Upper Mississippi Valley. *Quaternary Research*, 23: 287-300.
- Knox, J.C., 2000.** Sensitivity of modern and Holocene floods to climate change. *Quaternary Science Reviews*, 19, 439-457.
- Kochel, R.C. et Baker, V.R. 1988.** Paleoflood analysis using slackwater deposits., p.357-376. *In* V.R. Baker, R.C. Kochel et P.C. Patton, ed. *Flood geomorphology*, Wiley (Wiley-Interscience Publication), New York. USA.
- Komar, P.D. 1988.** Sediment transport by floods., p. 97-112. *In* V.R. Baker, R.C. Kochel et P.C. Patton, eds. *Flood geomorphology*. Wiley (Wiley-Interscience Publication), New York, USA.



- Krauss, M.J. et Bown, T.M. 1986.** Paleosols and time resolution in alluvial stratigraphy, p.180-207. In V.P. Wright, ed. *Paleosols : Their Recognition and Interpretation*. Blackwell, Oxford.
- Livingston, J.M., Smith, D.G., Froese, D.G., Parkstrom, G.J., Parker, M.K., 2001.** Reconstructing the late Holocene (last 3000 years) ice-jam flood history on the middle Yukon River. CANQUA Congress, Whitehorse, TNO, Canada, August, 20-24, 2001.
- Macklin, M.G., Rumsby, B.T., Heap, T., 1992.** Flood alluviation and entrenchment : Holocene valley-floor development and transformation in the British Uplands. *Geological Society of America Bulletin*, 104, 631-643.
- Magilligan, F.J. 1992.** Sedimentology of a fine-grained aggrading floodplain. *Geomorphology*, 4: 393-408.
- Mahaney, W. C. 1998.** Dating methods. *Progress in Physical Geography*, 22: 114-120.
- Martin, C.W. 1992.** Late Holocene alluvial chronology and climate change in the central Great Plains. *Quaternary Research*, 37: 315-322.
- McKee, E.D., Crosby, E.J. et Berryhill, H.L (Jr.) 1967.** Flood deposits, Bijou creek, Colorado, June 1965. *Journal of Sedimentary Petrology*, 37: 829-851.
- O'Connor, J.E., Ely, L.L., Wohl, E.E., Stevens, L.E., Melis, T.S., Kale, V.S., Baker, V.R. 1994.** A 4500-year record of large floods on the Colorado River in the Grand Canyon, Arizona. *Journal of Geology*, 102, 1-9.
- Oetelaar, G.A. 2002.** River of change: a model for the development of terraces along the Bow River. *Géographie physique et Quaternaire*, 56: 155-169.
- Ostenaar, D.A., O'Connell, D.R.H., Walters, R.A. et Creed, R.J. 2002.** Holocene paleoflood hydrology of the Big Lost River, western Idaho National Engineering and Environmental Laboratory, Idaho, *Geological Society of America Special Paper*, 353: 91-110.
- Richter, B.D., Baumgartner, J.V., Powell, J. et Braun, D.P. 1996.** A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation Biology*, 10 : 1163-1174.

**Ritter, D.F., Kinsey, W.F., Kauffman, M.E. 1973.** Overbank sedimentation in the Delaware river valley during the last 6000 years: *Science*, 179: 374-375.

**Saint-Laurent, D. 2004.** Palaeoflood hydrology: an emergence science. *Progress in Physical Geography*, 28: 531-543.

**Saint-Laurent, D., et Lavoie, L. 2003.** Chronology of recent and ancient flood sequences in the Saint-François river, Québec, Canada. Third International Paleoflood Workshop (Abstract & posters), August 1-7, 2003, Hood River, Oregon, USA.

**Saint-Laurent, D., et Lavoie, L. 2004.** Les différentes approches méthodologiques de reconstitution des paléo-inondations : une revue de la littérature. *Revue des Sciences de l'Eau*, 17: 91-115.

**Saint-Laurent et St-Laurent, J. 2004.** Evaluation of spatial distribution of contaminated sediments in Saint-François terraces, Québec, Canada. The 15<sup>th</sup> Annual Conference of the International Environmetrics Society and the 6<sup>th</sup> International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences. (Abstracts & posters), June 28–July 1, 2004, Portland, Maine, USA.

**Saint-Laurent, D., et Saucet, J.-P. 2003.** Chronological reconstitution of floods of the Saint-François Drainage Basin, Québec, Canada. Proceedings 3<sup>rd</sup> Canadian Conference on Geotechnique and Natural Hazards, Edmonton, Alberta, June, 9-10, 2003.

**Saint-Laurent, D., Lavoie, L. et St-Laurent, J. 2004.** Historique des inondations et variations climatiques : Un exemple du centre-sud du Québec (Canada). In 57th Annual Conference of the Canadian Water Resources Association, Water and Climate change. (Abstracts & posters), June 16-18, 2004, Montréal, Québec, Canada.

**Saint-Laurent, D., Couture, C. et McNeil, E. 2001.** Spatio-temporal analysis of floods of the Saint-François drainage basin, Québec, Canada. *Environments*, 23: 73-89.

**Scully, R.W. et Arnold, R.W. 1981.** Holocene alluvial stratigraphy in the Upper Susquehanna River Basin: New York. *Quaternary Research*, 15: 327-344.

**Taylor, M.P. et Brewer, P.A. 2001.** A study of Holocene floodplain particle size characteristics with special reference to paleochannel infills from the upper Severn basin, Wales, UK. *Geological Journal*, 36:143-157.

**Waythomas, C.F., Jarrett, R.D., 1994.** Flood geomorphology of Arthurs Rock Gulch, Colorado : paleoflood history. *Geomorphology*, 11, 15-40.

**Webb, R.H., Blainey, J.B., Hyndman, D.W., 2002.** Paleoflood hydrology of the Paria River, southern Utah and Northern Arizona, U.S.A In: «Ancient floods, modern hazards: principles and application of paleoflood hydrology», House, P.K., Webb, R.H., Baker, V.R. and Levish, D.R. [Eds], *Water Science and Application 5*, American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 295-310.

**Williams, G.P. et Costa, J.E. 1988.** Geomorphic measurements after a flood, p. 65-77. *In* V.R. Baker, R.C. Kochel et P.C. Patton, ed., *Flood geomorphology*, Wiley (Wiley-Interscience Publication), New York, USA.

**Wolman, M.G. et Leopold, L.B. 1957.** River flood plains : some observations on their formation. U.S. Geological Survey Professional Paper, 282-C: 87-109 Washington D.C.

**Yang, D., Yu, G., Xie, Y., Zhan, D., Li, Z., 2000.** Sedimentary records of large Holocene floods from the middle reaches of the Yellow River, China. *Geomorphology*, 33, 73-88.

**Zawada, P.K., Hattingh, J., 1994.** Studies on the palaeoflood hydrology of South African rivers. *Suid-Afrikaanse Tydskrif vir Wetenskap*, 90, 567-568.

## CHAPITRE II

### ANALYSE DES SOLS ET PALÉOSOLS EN PLAINE ALLUVIALE ET TAUX DE SÉDIMENTATION

L. Lavoie<sup>1</sup>, D. Saint-Laurent<sup>2</sup> et J. St-Laurent<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Chimie-Biologie, Université du Québec à Trois-Rivières, C.P. 500, Trois-Rivières, Québec, G9A 5H7

<sup>2</sup> Géographie, Université du Québec à Trois-Rivières, C.P. 500, Trois-Rivières, Québec, G9A 5H7

Téléphone : (819) 376-5011 (poste 3674), télécopieur : (819) 376-5179

<sup>2</sup> Adresse de correspondance : Courriel: [diane\\_saint-laurent@uqtr.ca](mailto:diane_saint-laurent@uqtr.ca)

Article soumis Mai 2005

## Résumé

Cette étude porte sur la dynamique fluviale des rivières du sud du Québec et plus particulièrement sur le développement des sols alluviaux assujettis aux récurrences d'inondation. La fréquence des événements d'inondation dans les bassins du centre-sud du Québec, soit le long de la rivière Saint-François et ses principaux tributaires, entraîne un apport constant de sédiments de crues sur les plaines alluviales et provoque un rajeunissement des sols, ce qui en fait des sols peu évolués. Les analyses granulométriques et physico-chimiques réalisées ont permis de mieux comprendre la dynamique de formation des plaines alluviales ainsi que le développement des sols associés à ces environnements fluviaux. Les analyses sédimentologiques (nature texturale et épaisseur des couches) combinées aux datations radiocarbone ( $^{14}\text{C}$ ) ont permis aussi d'évaluer les taux de sédimentation le long des berges. Les datations  $^{14}\text{C}$  obtenues à partir des couches organiques enfouies dans les plaines indiquent des âges relativement variables, soit entre  $2210 \pm 60$  ans et  $30 \pm 70$  ans BP selon les secteurs d'étude. Enfin, les données recueillies révèlent une importante accumulation sédimentaire qui témoigne de la récurrence des inondations dans ce secteur. On évalue que les apports annuels lors des crues sont de l'ordre de  $1,5$  à  $3,5 \text{ cm a}^{-1}$  en moyenne, ce qui provoque un rehaussement des niveaux des plaines alluviales au cours des années. Aussi, la présence de couches contaminées (hydrocarbures  $\text{C}_{10}\text{-C}_{50}$ ) observées le long des plaines a permis d'évaluer les apports alluvionnaires qui sont de l'ordre de  $1,84$  à  $3,55 \text{ cm a}^{-1}$ . La variabilité des taux sédimentaire dépend en grande partie du contexte géomorphologique et de la dynamique fluviale propre à chacun des secteurs d'étude.

**Mots clés:** sols et paléosols, inondations, plaines alluviales, taux sédimentaire, contamination.

## Abstract

This study pertains to the fluvial dynamics of rivers in south-central Quebec, in particular the aggradation and pedogenesis processes observed in alluvial terraces affected by floods. The frequency of flood events in south-center Québec basins, notably along the Saint-François river and its main tributaries, leads to fine sediments being continuously deposited on floodplains and weak development of alluvial soils. Particle size and physico-chemical analyses have led to a better understanding of the dynamics involved in the formation of alluvial terraces and the development of soils and paleosols related to this fluvial environment. Sedimentological analysis (layer texture and thickness) combined with radiocarbon dating ( $^{14}\text{C}$ ) also enabled the determination of sedimentation rates along the terraces. The radiocarbon-14 dating results obtained from the organic layers buried in terrace soils and paleosols show relatively variable ages, i.e. between  $2210 \pm 60$  years BP and  $30 \pm 70$  years BP, depending on the study areas. The data gathered reveal major sheetflow deposition, which shows evidence of the recurrence of floods in this area. It is estimated that the annual floodplain aggradation ranges from 0.5 to  $3.5 \text{ cm a}^{-1}$  on average, which causes substantial increases in terrace levels. Also, the presence of contaminated layers (hydrocarbons  $\text{C}_{10}\text{-C}_{50}$ ) along terraces allowed to estimate the sedimentation rates which are of the order from 1.84 to  $3.55 \text{ cm a}^{-1}$ . The variability of sedimentation rates depends to a large extent of the geomorphological context and the fluvial dynamics specific to each study area.

**Key words:** soils and paleosols, floods, alluvial terraces, sedimentation rate, contamination.

## INTRODUCTION

Les travaux traitant de la géomorphologie et de la sédimentologie des plaines alluviales sont nombreux (Anderson et al. 1996; Brakenridge 1988; Gomez et al. 1998; Knighton, 1998; Magilligan 1992; Wolman et Leopold 1957, etc.). Mentionnons notamment les travaux portant sur l'évolution morpho-sédimentologique des plaines alluviales et les conditions hydro-climatiques associées à ces milieux (Knox 1986; Martin 1992; Ritter et al. 1973; Taylor et Brewer 2001), ou encore ceux traitant des relations entre les variations du régime hydrologique, la fréquence et l'ampleur des inondations, les séquences sédimentologiques et stratigraphiques (Baker 1987; Brakenridge 1988; Komar 1988; Marriott 1992; Williams et Costa 1988). Cependant, les travaux consacrés à la genèse des sols des plaines alluviales demeurent plus restreints en nombre (Aslan et Autin 1998; Bull 1990; Daniels 2003; Ferring 1992; Klawon et al. 2000; Krauss et Bown 1986), et ceci s'applique aussi aux travaux menant à l'analyse des sols soumis à des inondations fréquentes. Pourtant l'analyse et la caractérisation des sols alluviaux et l'étude géomorphologique des plaines fluviales constituent des paramètres morpho-pédologiques indissociables pour comprendre la dynamique et l'évolution des systèmes fluviaux (Autin et al. 1998). En effet, les paramètres pédogénétiques et sédimentologiques utilisés conjointement permettent de mieux comprendre la dynamique fluviale qui dépend elle-même des facteurs climatiques et anthropiques qui influent sur les variations du régime hydrologique. Les sols et les paléosols enfouis dans les plaines fournissent notamment des indications sur les phases plus ou moins longues de stabilisation, en considérant le développement pédogénétique des sols *in situ* par exemple (Aslan et Autin 1998; Bull 1990; Daniels 2003), alors que les faciès sédimentologiques et l'utilisation des méthodes de datation fournissent des indices sur le mode de déposition, le taux sédimentaire, l'âge et le développement des plaines (Brooks 2002; Gomez et al. 1998; Nielsen et al. 1993; Oetelaar 2002; Taylor et al. 2001; Williams et Costa, 1988). L'analyse des sols alluviaux apporte en fait des indices additionnels sur la formation des

plaines et la dynamique fluviale (Aslan et Autin, 1998; Autin et al., 1998; Bull, 1990). On comprend mieux par exemple que les plaines alluviales soumises à des inondations récurrentes se caractérisent par une succession de sols plus ou moins développés qui témoigne de la variation des taux sédimentaire et du développement des plaines (Daniels 2003), ou encore que la présence de couches altérées ou indurées intercalées dans les sédiments de crues suggère des phases de stabilité des plaines associées à certaines phases climatiques (Brooks 2002; Nielsen et al. 1993).

En somme, la description morphologique des sols en plaine et leur degré de maturité constituent des indices pédogénétiques fort utiles pour comprendre les processus d'édification des plaines soumises à des crues successives. Comme le souligne Daniels (2003), l'utilisation des sols devient un élément d'interprétation unique pour comprendre la dynamique des environnements fluviaux «...*Floodplain soils provide unique opportunities for interpreting past environmental change because their properties represent an integration of geomorphic and pedologic processes* » (Daniels 2003, p. 226). L'importance donc de combiner une approche géopédologique (Phillips 2004) apparaît plus que nécessaire pour comprendre les différents systèmes fluviaux, notamment ceux soumis à une dynamique particulière. Il faut souligner toutefois que la principale difficulté dans l'interprétation des séquences sédimentologiques réside dans l'identification (ou l'individualisation) de chaque événement d'inondation (Saint-Laurent et Lavoie 2004, p.106). La superposition de plusieurs inondations successives sur une courte période de temps (échelle décennale par exemple) rend en effet difficile de discriminer chaque événement d'inondation, notamment en raison de la faible différenciation des faciès sédimentologiques et texturaux des séquences. Il devient donc nécessaire de considérer différents paramètres morphométriques pour tenter de reconstituer le mieux possible les phases d'alluvionnement associées aux crues. Dans le cadre de cette étude, nous avons donc tenté de combiner dans une approche géopédologique différents paramètres pédologiques (granulométrie,



horizonation, pH, C.O.%, teneur des sesquioxydes, etc.), afin de mieux comprendre le développement des sols soumis à une dynamique fluviale associée à des récurrences d'inondation, tout en mettant en parallèle l'utilisation des paramètres sédimentologiques (nature des sédiments, faciès de déposition, datation radiocarbone, etc.). Dans un deuxième temps, nous avons tenté d'évaluer l'importance des phases d'inondation dans l'édification des plaines alluviales à partir d'une évaluation des taux de sédimentation en combinant ces différents paramètres. Notre hypothèse de départ assume que les plaines alluviales de la région d'étude sont soumises à des phases d'alluvionnement importantes qui seraient attribuables à une augmentation des inondations depuis les dernières décennies, en particulier après les années 1970 (Saint-Laurent et Saucet 2003). Pour réaliser cette étude, nous avons choisi la région hydrographique 02 (Environnement Canada 2001) qui comprend les rivières des bassins et sous-bassins du centre-sud du Québec, lesquelles rivières sont soumises à des inondations fréquentes (Saint-Laurent et al. 2001). Enfin, l'étude conjointe entre l'analyse des sols alluviaux et la formation des plaines permettra de mieux comprendre la dynamique fluviale des bassins hydrographiques de cette région et se veut aussi une contribution à l'étude des sols alluviaux soumis à des inondations périodiques.

## MÉTHODES

La région d'étude couvre le bassin hydrographique du centre-sud du Québec qui regroupe plusieurs rivières importantes dont les rivières Saint-François, Massawippi, Magog, Au Saumon et Eaton, toutes situées sur le versant sud du fleuve Saint-Laurent (Fig. 2.1). Ce vaste bassin d'une superficie de 10 221 km<sup>2</sup> recoupe les Basses-Terres du Saint-Laurent (secteur nord-ouest) et le plateau Appalachien (secteur sud et sud-est), lequel s'étend au-delà des frontières américaines. La région appalachienne occupe la majeure partie du bassin amont qui se caractérise par un relief montagneux où l'occupation du sol est dominée par des activités agroforestières, alors que la région des Basses-

Terres qui constitue la partie aval du bassin, se caractérise par la prédominance de l'agriculture et des activités urbaines. Sur le plan géomorphologique, la rivière Saint-François et ses principaux tributaires s'enfoncent dans des dépôts meubles d'origines diverses mis en place lors des derniers événements glaciaires et postglaciaires (Parent 1977), lesquels événements ont largement modelé le paysage fluvial de tout ce bassin hydrographique. Enfin, les cartes des dépôts superficiels des secteurs d'étude (MER 1983) indiquent que les berges des rivières Saint-François, Massawippi, Eaton et Eaton Nord et autres tributaires sont composées principalement de sédiments alluvionnaires récents ou anciens, de tills, de dépôts fluvio-glaciaires et glacio-lacustres ou encore d'affleurements rocheux.

Les stations d'échantillonnage et d'observation (56 au total) ont été sélectionnées en fonction des zones du risque d'inondation identifiées sur les cartes produites par Environnement Canada et le ministère de l'Environnement du Québec (MENV 1982) à l'échelle du 1:10 000. Ces stations d'échantillonnage sont localisées dans les zones de plaines inondables délimitées par les récurrences de 0-20 ans et 20-100 ans. Le choix des stations s'est fait en sélectionnant les plaines alluviales localisées le long des rivières Saint-François, Massawippi, Au Saumon, Eaton et Eaton Nord. Ces plaines forment des replats subhorizontaux (Fig. 2.2) avec des hauteurs moyennes de 1,50 à 3,50 mètres et des largeurs variant entre 15 à 30 mètres. L'ensemble des plaines inondables ont été visitées et seuls les sites perturbés (artificialisation des rives, constructions diverses, etc.) ont été exclus de l'échantillonnage, ce qui représente environ 10-20% de la totalité des plaines inondables des différents secteurs d'étude. En terme de population statistique, on peut dire que les stations retenues sont en nombre suffisant pour être représentatif de l'ensemble des plaines alluviales des différents secteurs. Enfin, les stations ont été sélectionnées directement en bordure des plaines afin d'obtenir une vision d'ensemble de la rive, tout en cherchant les discontinuités sédimentologiques et la présence d'horizons organiques enfouis dans les sédiments. Aussi, sur le

replat des plaines alluviales, plusieurs vérifications par tarière ont été effectuées pour évaluer les variations texturales des sédiments de surface ( $\pm 1$  m de profondeur).

Pour l'analyse des sols et des paléosols, 20 stations d'échantillonnage comprenant une description morphologique détaillée de chacun des profils a été réalisée. Parmi ces stations, quatre sont situées dans le secteur Saint-Nicéphore (SNI), huit dans le secteur Richmond-Windsor (RIC-WIN), trois dans le secteur Massawippi (MAS) et cinq se trouvent dans le secteur Eaton (EAT) (Fig. 2.1). Une description morphologique détaillée des profils de sols a été effectuée pour chacune des stations d'échantillonnage et les pédons ont été classés selon les critères du *Système canadien de classification des sols* (SCCS) (Groupe de travail sur la classification des sols (GTCS 2002). Pour l'analyse des sédiments des plaines alluviales, on dénombre 36 stations d'observation pour lesquelles les sédiments de surface (0-100 cm) étaient prélevés à l'aide d'une tarière. On compte 28 stations localisées dans la partie aval du bassin, soit dans les secteurs SNI et RIC-WIN, et huit autres dans le secteur MAS. La localisation géographique de l'ensemble des stations a été établie à l'aide d'un GPS Garmin E-TREX se rapportant au système de projection «Universal Transverse Mercator» (UTM), ce qui a fourni un positionnement précis des stations étudiées, ainsi qu'une position relative du niveau d'élévation des plaines alluviales. Les paramètres utilisés dans la description morphologique des profils de sols sont les suivants : profondeur et épaisseur des horizons, couleur des horizons (*Guide Munsell*), profondeur et abondance des racines, présence de marbrures, texture, structure et pierrosité. Une attention particulière a été portée sur les caractéristiques sédimentologiques (faciès, variations texturales, etc.) des profils de sols.

Les horizons de sols échantillonnés ont été soumis à différentes analyses en laboratoire afin de mieux caractériser la nature granulométrique des dépôts, d'évaluer leur développement pédogénétique et ensuite les classer suivant les

ordres et sous-groupes de sol du SCCS (GTCS 2002). Préalablement, un profil de sol a été décrit et analysé en détail (EAT-8a) afin d'évaluer les différences morphologiques et physico-chimiques les plus marquées du pédon (Fig. 2.3). Les faibles variations obtenues suite aux analyses préliminaires a conduit à la sélection de 2 à 3 échantillons par profil à des profondeurs déterminées (10, 25 et 75 cm) pour les analyses physico-chimiques des autres profils. Ainsi, pour les analyses granulométriques, les échantillons ont été analysés suivant les différentes classes texturales du SCCS (GTCS 2002) et, pour les analyses chimiques, les méthodes utilisées ont été le dosage de Al et Fe extractibles au pyrophosphate de sodium (McKeague 1978), le pH ( $\text{CaCl}_2$ ) en utilisant un rapport sol: solution de 1: 2 et finalement, la concentration en carbone organique totale (C.O.%) par la méthode de Yeomans et al. (1988). Les analyses chimiques ont été réalisées au laboratoire des sols du Centre de recherche en biologie forestière de l'Université Laval et les analyses granulométriques au laboratoire Agro-Enviro-Lab Inc.

Afin de déterminer l'âge des plaines alluviales, des échantillons de matière organique (11 au total) ont été prélevés dans les sols et paléosols pour la datation au radiocarbone ( $^{14}\text{C}$ ). Au total, neuf profils avec présence d'horizons organiques enfouis dans les sédiments ont pu être échantillonnés et datés. Les horizons organiques de certains profils de sols (WIN-4, EAT-8, SAU-11) dont la quantité de matière organique était insuffisante n'ont pu être datés. Les datations  $^{14}\text{C}$  obtenues ont été calibrées en âge calendrier (*cf.* Stuiver et al. 1998) par le laboratoire de radiochronologie du CEN de l'Université Laval. Le nombre de datation obtenue nous apparaît insuffisant pour permettre l'établissement d'une chronologie complète de l'âge des plaines alluviales dans leur ensemble, cependant, les dates obtenues à partir des datations  $^{14}\text{C}$  ont permis d'évaluer les taux de sédimentation dans certains secteurs. Pour évaluer ces taux, le calcul s'est basé sur l'épaisseur des sédiments en divisant ce nombre par la date calendrier médiane obtenue par la conversion des datations radiocarbone pour chacun des profils. La date de référence étant l'année 2003

(par exemple 124 cm/133 ans). Enfin, la présence de couches contaminées (hydrocarbures  $C_{10}$ - $C_{50}$ ) dans 5 coupes réalisées le long des berges des secteurs RIC-WIN et MAS (Fig. 2.1) ont été utilisées comme autre repère chronologique dans l'évaluation de l'apport sédimentaire pour ces deux secteurs. Les échantillons contaminés ont été soumis au laboratoire Biolab Inc. (Division Cap-de-la-Madeleine) en suivant le protocole d'échantillonnage soumis par le laboratoire. L'estimation des taux de sédimentaire s'est basée sur la date présumée de la contamination (année 1955) et l'épaisseur des sédiments mesurés en 2004 (174 cm/49 ans).

## RÉSULTATS

Les sols et paléosols analysés ont été classés parmi les ordres régosoliques et brunisoliques du SCCS (GTCS 2002). Les régosols orthiques, les régosols cumuliques, les régosols gleyifiés et les régosols cumuliques gleyifiés composent la majeure partie des sols des plaines alluviales (Fig. 2.4 et 2.5). Ces sols sont généralement peu développés, caractérisés notamment par l'absence d'horizons Ah et d'horizons d'accumulation (B), et par une faible altération chimique. Les autres sols sont des brunisols dystriques orthiques et dystriques gleyifiés qui se caractérisent par la présence d'horizons d'accumulation Bm ou Bfj généralement peu épais et d'une coloration légèrement plus rougeâtre. Cependant, il faut noter que certains horizons indiquent une altération plus prononcée, soit une concentration supérieure à 0,4% d'Al et de Fe pour les sols à matrice sableuse (Tableau 2.1), ce qui permet de les classer parmi les horizons podzoliques (Bfj). Toutefois, la faible coloration des horizons, les concentrations de C.O. (%) peu élevées, l'absence d'horizons Ah et Ae sus-jacents permet difficilement de considérer ces sols comme des podzols. En ce qui a trait aux horizons organiques, ils sont généralement minces ( $\approx 0,5$  cm) et sont constitués de fragments organiques plus ou moins décomposés. Un seul horizon organique contenant des charbons de bois visibles à l'oeil nu a été trouvé à la station EAT-8, témoignant du passage d'un

feu à proximité. Ces horizons organiques sont recouverts de sédiments de crues de plus de 100 cm d'épaisseur, à l'exception de quelques profils dont les horizons organiques se trouvent plus près de la surface (WIN-4, EAT-8, EAT-8a). Les datations  $^{14}\text{C}$  obtenues à partir des horizons organiques varient entre un âge moderne ( $\pm 50$  ans BP) et  $2210 \pm 60$  ans BP. Une description plus détaillée des sols et paléosols est présentée pour chacun des secteurs d'étude.

### *Secteur Saint-Nicéphore (SNI)*

Le secteur Saint-Nicéphore se situe entre Drummondville et Ulverton (Fig. 2.1) et les plaines de ce secteur sont composées principalement de sédiments alluviaux récents ou anciens (MER 1983). Les sédiments des stations d'échantillonnage (SNI-1, SNI-2, SNI-3, AVE-9) et d'observation (SNIO-1, SNIO-2, SNIO-3, SNIO-4, SNIO-5, SNIO-6, SNIO-7, SNIO-8 et ULVO-9) sont constituées surtout de dépôts fins (limons, sables fins) (Tableaux 2.1 et 2.2). Les sols et paléosols ont été classés parmi les régosols orthiques et les régosols cumuliques gleyifiés et les brunisols dystriques gleyifiés (Fig. 2.4). Ils se sont formés par l'accumulation progressive des sédiments alluviaux provenant des crues (Fig. 2.6a). Ces sols indiquent généralement des valeurs de pH qui varient entre 5,94 et 6,22 et des taux de C.O. situés entre 0,64 et 2,05%. Les sesquioxydes d'Al et Fe présentent des valeurs qui se situent entre 0,35 et 0,40%. À la base des profils, certains horizons montrent des signes de gleyification qui témoignent des fluctuations de la nappe phréatique. Cette caractéristique est d'ailleurs commune à plusieurs profils de sols situés en plaine alluviale. Quatre horizons organiques ont été datés dans ce secteur dont deux dans le profil de la station SNI-1 (Fig. 2.4). Ces paléosols ont des âges relativement jeunes, soit entre un âge moderne (SNI-1) et  $140 \pm 60$  ans BP (SNI-2). Ces sols enfouis sont recouverts de dépôts alluviaux d'une épaisseur qui varient entre 84 cm (SNI-1) et 124 cm (SNI-1), ce qui constitue une accumulation sédimentaire importante considérant les dates  $^{14}\text{C}$  obtenues (Tableau 2.3). Ceci indique que la récurrence des inondations est élevée dans

ce secteur. Ces fortes accumulations sédimentaires sur une période relativement courte révèlent par ailleurs une édification rapide des plaines alluviales. À la station SNI-1, l'accumulation des sédiments de crues pourrait correspondre à un taux moyen de l'ordre de  $0,93 \text{ cm a}^{-1}$ , alors qu'à la station SNI-2, le taux moyen serait de l'ordre de  $0,68 \text{ cm a}^{-1}$  (Tableau 2.3). Ces taux sédimentaires ne tiennent pas compte toutefois des pertes causées par l'érosion fluviale, ni de l'ampleur et de la fréquence des crues à chacune des stations. Enfin, on peut observer des sédiments plus grossiers à la base de certains profils (SNI-1, SNI-3 et AVE-9), ce qui pourrait correspondre à des niveaux d'anciennes terrasses ou simplement à des variations dans l'écoulement fluvial. Certaines stations d'observation (SNIO-1 et SNIO-3) renferment aussi des sédiments plus grossiers (sables grossiers) (Tableau 2.2) qui pourraient être associés aussi à des changements du régime hydrologique lors des phases d'édification des plaines alluviales.

#### *Secteur Richmond-Windsor (RIC-WIN)*

Ce secteur d'étude est situé entre les limites de la municipalité d'Ulverton au nord-ouest du bassin et la ville de Sherbrooke plus au sud (Fig. 2.1). Les berges de ce secteur sont caractérisées par des dépôts d'origine glacio-lacustre ou des alluvions (récentes ou anciennes) trouvés sur la majorité du tronçon (MER 1983). Les sols des plaines alluviales sont constitués surtout de limons sableux fins à très fins (Tableau 2.1). Les stations d'échantillonnage (WIN-4, WIN-5, WIN-10, SAU-11, TRE-14, BRO-18, STO-19, RIC-20) et les stations d'observation (ULVO-9, RICO-10, RICO-11, RICO-12, WINO-13, WINO-14, WINO-15, WINO-16, WINO-17, STOO-18, STOO-19, STOO-20, WINO-25) permettent de constater la présence de sédiments de crues sur plusieurs centimètres d'épaisseur ( $>100 \text{ cm}$ ) (Fig. 2.6b), ce qui s'apparentent au secteur de Saint-Nicéphore caractérisé aussi par de fortes accumulations d'alluvions. Les sols et paléosols se classent parmi les régosols orthiques, les régosols gleyifiés, les régosols cumuliques et les régosols cumuliques gleyifiés (Fig. 2.4 et 2.5), témoignant d'un faible développement pédogénétique et de conditions

d'anaérobie à la base des profils. Les sols indiquent des valeurs de pH qui varient entre 4,71 et 6,13 et les taux de carbone organique se situent entre 1,16 et 3,16%. Les sesquioxides d'aluminium et de fer sont négligeables avec un taux moyen de 0,49% pour l'ensemble des profils de sols examinés (Tableau 2.1). Toutefois, certains horizons plus altérés ont été désignés parmi les horizons Bfj (WIN-10, SAU-11, STO-19). La datation des horizons organiques de deux des profils (WIN-5 et RIC-20) a fourni des âges relativement récents, soit  $200 \pm 60$  ans BP et  $160 \pm 70$  ans BP. Les paléosols sont recouverts par plus de 135 cm (WIN-5) et 155 cm (RIC-20) de sédiments de crues, ce qui indique encore une fois une forte récurrence des inondations. En considérant les épaisseurs des sédiments en surface et les datations  $^{14}\text{C}$  obtenues, on obtient un taux moyen de sédimentation de  $0,77 \text{ cm a}^{-1}$  pour la station RIC-20 et un taux moyen de  $0,57 \text{ cm a}^{-1}$  pour la station WIN-5 (Tableau 2.3). La présence d'une couche contaminée (hydrocarbures  $\text{C}_{10}\text{-C}_{50}$ ) identifiée au profil de la station WIN-H, laquelle couche est située à une profondeur de 174 cm de la surface (Fig. 2.7), a servi de repère chronologique pour évaluer le taux de sédimentation de ce profil. Bien que la date précise de la contamination demeure incertaine (l'année probable de la contamination aurait eu lieu en octobre 1955 (*cf. La Tribune*, 1955), il est donc possible que la sédimentation à cet endroit serait de l'ordre de  $3,55 \text{ cm a}^{-1}$ . Plus en amont, la station STO-H montre une accumulation de 205 cm d'épaisseur sus-jacent la couche contaminée, ce qui indiquerait un taux sédimentaire de l'ordre de  $4,18 \text{ cm a}^{-1}$ . Enfin, dans la section aval de ce même secteur, l'accumulation des sédiments serait de  $2,45 \text{ cm a}^{-1}$  pour le profil TREN-H (Fig. 2.7). On peut noter que ces valeurs sont supérieures à celles obtenues par les datations radiocarbone.

#### *Secteur Massawippi (MAS)*

La rivière Massawippi est l'un des tributaires importants de la rivière Saint-François et rejoint cette dernière à la hauteur de Lennoxville (Fig. 2.1). La morphologie du chenal est de type méandrique et la rivière circule dans des berges plus ou moins hautes (1-3 m en moyenne), constitués essentiellement



de sédiments fluviaux ou de dépôts glacio-lacustres (MER 1983). Les stations d'échantillonnage (MAS-12, MAS-13, LEN-17) et d'observation (MASO-21, MASO-22, MASO-23, MASO-24, MASO-26, MASO-27) localisées le long des plaines sont caractérisées par des sols formés de limons sableux et des sables limoneux fins (Tableaux 2.1 et 2.2). Dans ce secteur, les sols ont été classés parmi les régosols orthiques et les régosols gleyifiés (Fig. 2.5). Ils indiquent des valeurs de pH variant entre 4,61 et 5,61 et les taux de C.O. sont situés entre 0,86 et 2,16%. Les sesquioxydes d'Al+Fe montrent des faibles concentrations avec une valeur moyenne de 0,49% (Tableau 2.1), révélant que les processus pédogénétiques sont généralement limités dans ces sols alluvionnaires. Toutefois, on dénote une plus forte concentration de ces deux éléments dans les horizons du profil MAS-13, qui témoigne d'une altération plus prononcée. Pour le secteur, aucune datation radiocarbone n'a pu être obtenue en raison de l'absence de matériel organique dans les profils de sols examinés. Cependant, la présence de couches contaminées (hydrocarbures C<sub>10</sub>-C<sub>50</sub>) identifiées aux stations MAS-13 (Fig. 2.6c) et MAS-H, indiquerait des taux de sédimentation de l'ordre de 1,84 à 2,53 cm a<sup>-1</sup> respectivement (Fig. 2.7).

### *Secteur Eaton (EAT)*

Le secteur de la rivière Eaton et Eaton Nord se situe dans la partie sud-est de la zone d'étude (Fig. 2.1). Cette rivière circule principalement dans des dépôts fluviatiles, glacio-lacustres ou dans des tills (MER 1983). Les stations d'échantillonnage (EAT-6, EAT-7, EAT-8, EAT8a, EAT-15, EAT-16) sont localisées dans des dépôts alluvionnaires récents ou anciens, qu'on trouve essentiellement dans la partie amont de la rivière Eaton Nord. Les classes texturales des sols analysés sont semblables à ceux des autres secteurs, et les sédiments sont composés surtout de limons, de limons sableux fins, de sables limoneux et de sables limoneux fins à très fins (Tableau 2.1). Les sols des plaines alluviales ont été classés parmi les régosols orthiques, les régosols cumuliques et les régosols cumuliques gleyifiés, ainsi qu'un brunisol dystrique orthique situé à la station EAT 15 (Fig. 2.5). Ces sols sont modérément acides

indiquant des valeurs de pH variant entre 5,30 et 6,31 et les taux de C.O. varient entre 0,45 et 1,57%. Ces valeurs sont d'ailleurs comparables à celles obtenues pour les autres profils de sols (Tableau 2.1). Les taux d'Al+Fe extractibles au pyrophosphate indiquent des valeurs relativement faibles, situées entre 0,21 et 0,48%. Seul le profil de la station EAT-8 indique des taux d'altération de près de 0,4% pour l'horizon sableux IICb1 à la base du profil (75 cm). Mais de manière générale, on peut dire que les faibles concentrations de C.O. (%) et d'Al+Fe (%) qui caractérisent plusieurs de ces profils indiquent que les processus pédogénétiques sont limités, ce qui confère à ces sols des faciès peu évolués. Six paléosols ont été décrits le long de la rivière Eaton Nord, dont cinq ont pu être datés (Fig. 2.5). Les datations  $^{14}\text{C}$  obtenues fournissent des âges très variables, soit entre  $30 \pm 70$  ans BP (EAT-7) et  $2210 \pm 60$  ans BP (EAT-8a). Les paléosols sont recouverts par des sédiments de crues variant entre 45 cm (EAT-8a) et 179 cm (EAT-15). En considérant les épaisseurs des sédiments et les datations radiocarbone converties en âge calendrier, on obtient des taux d'accumulation variant entre 0,09 à  $1,06 \text{ cm a}^{-1}$  pour l'ensemble des profils étudiés (Tableau 2.3). Les valeurs sont comparables à celles obtenues dans les secteurs SNI et RIC-WIN, sauf pour la station EAT-8a. Aussi, les accumulations de sédiments de crues sont présents sur de larges sections riveraines et celles-ci peuvent atteindre plusieurs centimètres d'épaisseur (Fig. 2.6d), soit entre 50 et 180 cm en moyenne. La récurrence des inondations est donc tout aussi importante pour ce tronçon de la rivière Eaton Nord et influence de manière comparable le développement des plaines alluviales et l'évolution pédogénétique des sols que les autres secteurs d'étude. Enfin, on note des dépôts plus grossiers à la base de certains profils, ce qui correspond fort probablement aux anciens niveaux des plaines fluviales. D'ailleurs, la date radiocarbone obtenue de l'horizon organique prélevé au-dessus d'un lit de graviers du profil EAT-15 (Fig. 2.5), fournit un âge de  $2210 \pm 60$  ans BP, ce qui correspond à la période associée à la fin Holocène.

## DISCUSSION

### Développement des sols en plaine alluviale

L'étude des sols alluviaux localisés dans les différents secteurs d'étude révèle que leur développement est fortement limité par les apports sédimentaires provenant des crues successives. Ce sont des sols généralement peu différenciés au niveau des horizons et peu altérés. Ils présentent d'ailleurs des caractéristiques morphologiques et physico-chimiques très semblables entre eux. Soumis à des crues fréquentes, ces sols connaissent un rajeunissement constant qui nuit à leur développement pédogénétique. Les apports sédimentaires provenant des fortes crues ou des inondations, conduisent à la formation de sols jeunes de type régosolique ou brunisolique, peu ou non évolués. Les faibles taux de sesquioxydes d'Al et de Fe (%) contenus dans les profils et la faible coloration des horizons révèlent en effet que les processus pédogénétiques restent limités, en particulier dans les sols de surface ( $\pm 1$  m de profondeur). Les horizons légèrement plus altérés (Bm ou Bfj) se retrouvent à des profondeurs variables dans le profil et se distinguent assez peu des autres horizons (faible coloration, sans structure, etc.). Le faible niveau d'altération des horizons de sols des plaines alluviales est d'ailleurs une indication de l'alternance des épisodes d'alluvionnement qui caractérisent ces sols cumuliques, comme le mentionnent Aslan et Autin (1998): «...*Alternating or concurrent episodes of flood-plain sedimentation and pedogenesis produce cumulative soil profiles.*» (1998, p. 442). Outre le faible développement pédogénétique, les sols alluviaux se caractérisent aussi par de faibles concentrations de matière organique *in situ* (Daniels 2003), et souvent par l'absence ou la quasi-absence de litières en surface. On peut comprendre que l'accumulation de matière organique sur le replat des plaines alluviales se fasse difficilement en raison de crues successives qui nuisent à la formation d'une couverture végétale dense. Il est probable aussi qu'une partie du matériel organique de surface soit délogée et transportée plus en aval lors des crues, limitant ainsi le développement des litières. En somme, les faibles apports

organiques de surface réduisent les concentrations dans le solum qui se traduit notamment par une faible teneur en carbone organique *in situ*. Si l'on compare les valeurs obtenues en C.O. (%) dans les sols étudiés (Tableau 2.1) à ceux obtenus par Daniels (2003) dans les sols alluviaux de la rivière Republican (Nebraska) par exemple, on constate que ces valeurs sont généralement faibles, soit des taux variant entre 1,40 à 0,20% (Ibid 2003). Par ailleurs, ces apports limités de matière organique inhibent aussi le développement d'horizon organo-minéral (Ah), ce qui se traduit souvent par l'alternance d'horizons non altérés (C). La faible quantité de matière organique qui transite dans le solum réduit aussi les possibilités de transport (lessivage) des différentes particules ou agrégats du sol. Les colloïdes humiques ou argilo-humiques provenant de l'altération de la matière organique conditionnent en effet plusieurs processus au niveau du sol, notamment le transport des particules minérales, dont les sesquioxides métalliques comme l'aluminium et le fer (Calvet 2003, p. 231), ce qui peut expliquer en partie le faible développement d'horizons illuviaux (Bm, Bf, etc.). Enfin, en ce qui a trait à l'acidité des sols, on peut noter que ceux-ci sont modérément acides, avec des valeurs de pH variant entre 4,61 et 6,31 (Tableau 2.1). Les horizons en surface (25 cm) présentent des valeurs de pH comparables aux horizons situés plus en profondeur (75 cm), ce qui peut être une indication de la faible concentration des acides humiques en surface qui jouent normalement un rôle acidifiant au niveau des sols. Enfin, la nature des différentes roches mères qui constituent la source des sédiments alluviaux lors des crues doit aussi être considérée comme un facteur explicatif quant à la faible acidité de ces sols.

On peut dire que les conditions actuelles de mise en place des sédiments et surtout les récurrences d'inondation entraînent un faible développement pédogénétique et en font des sols aux faciès peu évolués. Les travaux de Aslan et Autin (1998), de Kraus et Bown (1987) et de Daniels (2003) en particulier, démontrent bien que les sols soumis à des phases d'alluvionnement récurrentes connaissent une faible maturation et que les processus de pédogénèse sont

d'autant ralentis par les apports constants d'alluvions déposés sur les plaines : « *In general, high aggradation rates correspond with poor soil development...* » (Daniels, 2003, p. 238). Ces sols alluviaux présentent sensiblement les mêmes caractéristiques, soit une faible teneur en matière organique, une faible structure et des horizons peu développés « *...Low organic matter content, weak soil structure, and thin horizons.* » (Ibid, p. 228). En somme, les différentes phases d'alluvionnement qu'entraînent les crues successives nuisent aux processus de formation des sols et maintiennent ces sols dans un état de faible maturité.

### **Édification des plaines et sédimentation**

L'étude des plaines alluviales révèle que leur développement est davantage soumis à des phases d'édification que des phases d'érosion, bien qu'il faille tenir compte de ces deux processus pour comprendre la dynamique fluviale des différents secteurs d'étude. En raison de la forte fréquence des inondations qui caractérise tout ce bassin hydrographique, les plaines alluviales sont alimentées constamment par l'apport de sédiments transportés sur le replat lors des débordements successifs. D'ailleurs, les différents travaux réalisés dans des environnements fluviaux soumis à des inondations (Brooks 2003; Daniels 2003; Gomez et al. 1998; Oetelaar 2003) indiquent que la quantité d'alluvions déposées lors des crues successives permet la construction latérale et verticale des plaines.

Au plan granulométrique, les sédiments déposés lors des crues sont généralement constitués de particules fines (limons, sables fins) formant un faciès relativement uniforme dans le profil (Magilligan 1992; Marriot, 1992; Taylor et Brewer 2001; Komar, 1968). Mentionnons que l'un des critères utilisés par Baker (1987) pour identifier les sédiments de crues (*slackwater deposits*) le long des berges est la taille granulométrique des dépôts composés essentiellement d'une matrice fine (limons, sables fins). Pour notre part, la prédominance de texture fine des sédiments en surface (0-100 cm ou plus) est

observée dans la plupart des stations, et les classes texturales varient assez peu, même sur des séquences allant jusqu'à plus d'un mètre de profondeur, sauf exception (Fig. 4 et 5). On peut dire que cette uniformité texturale constitue le trait dominant des sédiments alluvionnaires qui forment les plaines des secteurs étudiés. La disposition des sédiments (faciès ou microstructure) des sols de surface montre aussi une assez forte homogénéité. Les sédiments forment généralement des couches horizontales uniformes qui témoignent d'une certaine régularité de l'écoulement au moment de leur mise en place. D'ailleurs, aucun des profils observés présentait des lits fortement inclinés ou des formes fluviales particulières (lits entrecroisés, etc.) qui pourraient révéler des variations importantes des débits lors des phases d'alluvionnement (Williams et Costa 1988). Si les sédiments de crues s'identifient assez bien au niveau des classes texturales des profils observés, la difficulté réside davantage dans l'identification de différentes phases d'accumulation lors des crues. En effet, la faible différenciation (texture, horization, altération, etc.) entre les couches sédimentaires le long du profil ne permet pas de reconnaître chacun des événements associés à une inondation. Cette difficulté a d'ailleurs été soulevée dans les travaux de Gomez et al. (1998) notamment. Dans les milieux soumis à des inondations fréquentes, les périodes de stabilité des plaines alluviales sont insuffisantes pour permettre aux processus pédogénétiques d'opérer sur une période plus ou moins longue.

En ce qui a trait aux différents taux de sédimentation évalués à partir de l'épaisseur des sédiments et des datations radiocarbone converties en âge calendrier (Tableau 2.3), ceux-ci indiquent que les apports sont relativement importants le long des berges. La valeur minimale mesurée est de l'ordre de  $0,09 \text{ cm a}^{-1}$  et la valeur maximale est de  $1,06 \text{ cm a}^{-1}$ . Soulignons toutefois que ces valeurs demeurent relatives puisque les écarts-types obtenus par la datation radiocarbone sont non négligeables. Aussi, rappelons que les crues ne se produisent pas à chaque année et que l'ampleur et la fréquence de ces événements sont variables selon les secteurs. Toutefois, lors des débordements

de la rivière Saint-François et d'autres rivières du secteur (Massawippi, Coaticook, Magog) au printemps et à l'automne 2003, il a été possible d'observer un recouvrement de quelques centimètres (entre 1,5 et 3,5 cm) de sédiments fins sur le replat des plaines alluviales, après le retrait des eaux (Fig. 2.2). Ces observations fournissent un ordre de grandeur précis quant aux dépôts sédimentaires laissés lors des crues. De plus, en considérant les taux de sédimentation évalués à partir des couches de sédiments contaminés (hydrocarbures C<sub>10</sub>-C<sub>50</sub>), on obtient des valeurs moyennes de l'ordre de 1,84 à 4,18 cm a<sup>-1</sup> (Fig. 2.7). Considérant l'ensemble des données recueillies, on peut donc prétendre que les accumulations sédimentaires peuvent varier en moyenne entre 0,5 à 3,5 cm a<sup>-1</sup> suivant les secteurs d'étude. Pour les tronçons compris entre Sherbrooke et Saint-Nicéphore (secteurs SNI et RIC-WIN), les datations radiocarbone obtenues fournissent en général des âges plus récents, soit un âge moderne ( $\pm 50$  ans BP) et  $200 \pm 60$  ans BP (Tableau 2.3). Ces résultats suggèrent que les taux de sédimentation sont relativement importants et que les accumulations proviennent des inondations successives qui caractérisent tout ce secteur. Sur la rivière Eaton Nord, les datations radiocarbone obtenues fournissent en général des âges plus anciens. Par exemple, à la station EAT-15, la datation <sup>14</sup>C a fourni un âge de  $2210 \pm 60$  ans BP, soit la date la plus vieille obtenue pour l'ensemble des stations étudiées. Une autre datation <sup>14</sup>C obtenue par Lamothe et al. (2000) dans le même secteur révèle un âge de  $765 \pm 46$  ans BP. Bien que les plaines alluviales peuvent apparaître plus anciennes dans ce secteur, les sédiments de crues qui occupent le replat des plaines sont probablement récents, si l'on se fit au faible développement pédogénétique des sols *in situ* (Fig. 2.2 et 2.3). Enfin, il demeure difficile de déterminer avec certitude si les accumulations sédimentaires sont davantage associées aux récurrences des dernières décennies, bien que les accumulations qui reposent sur les couches contaminées le laissent supposer.

En comparant les valeurs obtenues à d'autres travaux réalisés dans différents milieux riverains affectés par des inondations (Nielsen et al. 1993; Daniels 2003; Brooks, 2003; Oetelaar, 2003), on remarque que les taux de sédimentation sont très variables d'une région à l'autre. Ceci s'explique en grande partie par les contextes géomorphologiques et hydrologiques propres à chacun des bassins hydrographiques, ainsi qu'aux variations climatiques qui influent sur les régimes hydrologiques. À titre d'exemple, les taux de sédimentation verticale obtenue par Brooks (2003) dans le secteur de la rivière rouge (Manitoba) peuvent varier entre 0,08 et 3,9 mm a<sup>-1</sup> et les accumulations dite contemporaines (moins d'un siècle), indiquent des valeurs de l'ordre de 1,6 à 14,3 mm a<sup>-1</sup>. Pour sa part, Daniels (2003) a obtenu des taux moyens de l'ordre de 0,5 cm a<sup>-1</sup> dans le secteur de la rivière Republican (Nebraska). Il faut retenir que ces apports sédimentaires façonnent progressivement les plaines alluviales en rehaussant graduellement leur niveau et peut modifier progressivement la configuration des rives. Dans le contexte où les conditions actuelles pourraient connaître des changements marqués, notamment par des variations importantes du régime hydrologique, induits par les changements climatiques par exemple, il devient intéressant de suivre l'évolution des ces milieux et tenter de mieux comprendre les interrelations entre les différents processus géomorphologiques et pédologiques.

## CONCLUSION

Les inondations fréquentes qui caractérisent les bassins du centre-sud du Québec, notamment les rivières Saint-François, Massawippi, Magog et Eaton sont responsables d'une dynamique de rajeunissement des sols et d'une édification des plaines alluviales. Le développement des sols alluviaux en plaine présentent en effet des caractéristiques morphométriques et physico-chimiques très semblables qui se traduit par une alternance de sols avec des faciès peu évolués. Ces sols alluviaux se caractérisent aussi par une faible teneur en carbone organique, une faible altération et une horizonation peu marquée. Au



niveau de l'édification des plaines, on note que les phases d'alluvionnement sont importantes et conditionnent de façon marquée le développement des sols. L'évaluation des taux de sédimentation réalisée à partir des accumulations de sédiments dans les profils et les datations radiocarbone obtenues des horizons organiques enfouis fournit un taux moyen de l'ordre de  $0,67 \text{ cm a}^{-1}$  avec des écarts variant entre  $0,09$  à  $1,06 \text{ cm a}^{-1}$ . Ces données combinées aux observations directes associées à deux crues récentes (printemps et automne 2003), et l'utilisation des couches contaminées observées dans les berges qui fournissent des repères chronologiques additionnels, permettent de prétendre que les accumulations sédimentaires peuvent varier en moyenne entre  $0,5$  à  $3,5 \text{ cm a}^{-1}$ , suivant les secteurs d'étude. Il faut toutefois considérer que les taux de sédimentation obtenus font abstraction de l'ampleur et la fréquence des inondations et des taux d'érosion fluviale. On doit retenir que ces apports sédimentaires façonnent progressivement les plaines alluviales en rehaussant graduellement leur niveau et parallèlement maintiennent les sols à un état de faible maturité.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) et l'UQTR pour les fonds institutionnels de recherche (FIR) pour le soutien financier à cette recherche. Aussi, nous remercions sincèrement M. François Péloquin pour son aide soutenue durant les travaux de terrain, et Mme Denise Beaudouin pour son aide à la mise en page du manuscrit.

## RÉFÉRENCES

- Anderson M. G., Walling D. E. et Bates P. D. (Éds.), 1996.** Flood-plain processes. Wiley, Chichester, 658 p.
- Aslan A. et Autin W. J. 1998.** Holocene flood-plain soil formation in the southern Lower Mississippi Valley : Implications for interpreting alluvial paleosols. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 110: 433-449.
- Autin W. J., Aslan A., Bettis E. A. et Walthall P. M. 1998.** Report from working group on alluvial pedogenesis. Part V. Working Group Report. *Quat. Intern.*, 51/52: 85-86.
- Baker V. R. 1987.** Paleoflood hydrology and extraordinary flood events. *J. Hydrol.*, 96: 79-99.
- Brakenridge G. R. 1988.** River flood regime and floodplain stratigraphy. Pages 139-156 in V.R. Baker, R.C. Kochel et P.C. Patton, eds. *Flood geomorphology*. Wiley (Wiley-Interscience Publication), New York, USA.
- Brooks G. R. 2002.** Floodplain chronology and vertical sedimentation rates along the Red river, southern Manitoba. *Géogr. phys. Quat.*, 56 : 171-180.
- Bull W. B. 1990.** Stream-terrace genesis: Implications for soil development. *Geomorphology*, 3: 351-367.
- Calvet R. 2003.** Le sol – Propriétés et fonctions. Constitution et structure, phénomènes aux interfaces, Tome 1, Éditions France Agricole, Dunod, 456 p.
- Daniels J. M. 2003.** Floodplain aggradation and pedogenesis in a semiarid environment. *Geomorphology*, 56: 225-242.
- Environnement Canada 2001.** Données hydrologiques, Hydat CD-Rom, version 2.02, Canada.
- Environnement Canada et ministère de l'Environnement (MENV) 1982.** Carte du risque d'inondation: Bassin de la rivière Saint-François (1: 10 000), Québec, Canada.
- Ferring C. R. 1992.** Alluvial pedology and geoarchaeological research. Pages 1-39 in V.T. Holliday (éd.). *Soils in archaeology. Landscape evolution and human occupation*. Smithsonian Institution Press, Washington, 253 p.

**Gomez B., Eden D. N., Peacock D. H. et Pinkney E. J. 1998.** Floodplain construction by recent, rapid vertical accretion: Waipaoa river, New Zealand. *Earth Surf. Proces. Landf.*, 23: 405-413.

**Groupe de travail sur la classification des sols 2002.** Le Système canadien de classification des sols. Direction générale de la recherche, Ministère de l'Agriculture et de Agro-Alimentaire du Canada. Publication 1646, 3<sup>e</sup> Édition. Ottawa, 196 p.

**Klawon J. E., Levish D. R. et O'Connell D. R. H. 2000.** Paleofloods and paleosols on the north Platte river. Stratigraphic records of exceedance and nonexceedance. *Geol. Soc. Am., Abstr.*, 32, A-509.

**Knox J. C., 1985.** Responses of floods to Holocene climatic change in the Upper Mississippi Valley. *Quat. Res.*, 23: 287-300.

**Knighton D. 1998.** Fluvial forms and processes. A new perspective. Arnold, London, 383 p.

**Komar P. D. 1988.** Sediment transport by floods. Pages 97-112 *in* V.R. Baker, R.C. Kochel et P.C. Patton, eds. Flood geomorphology. Wiley (Wiley-Interscience Publication), New York, USA.

**Krauss M. J. et Bown T. M. 1986.** Paleosols and time resolution in alluvial stratigraphy. Pages 180-207 *in* V.P. Wright, ed. Paleosols : Their recognition and interpretation. Blackwell, Oxford.

**Lamothe M., Rameseder B., Auclair M. et Huot S. 2000.** La stratigraphie du Quaternaire des bassins rivières Eaton et Saumon : Excursion géologique en Estrie. IX<sup>e</sup> Congrès de l'AQQUA, Montréal, Livret-guide d'excursion, 42 p.

**Magilligan F. J. 1992.** Sedimentology of a fine-grained aggrading floodplain. *Geomorphology*, 4: 393-408.

**Marriott S. 1992.** Textural analysis and modelling of a flood deposit: River Severn, U.K. *Earth Surf. Proces. Landf.*, 17: 687-697.

**Martin C. W. 1992.** Late Holocene alluvial chronology and climate change in the central Great Plains. *Quarter. Resear.*, 37: 315-322.

**Mckeague J. A. 1978.** Manuel de méthodes d'échantillonnage et d'analyse des sols. Société canadienne de la science du sol, (2<sup>e</sup> éd.), Ottawa, 267 p.

**Ministère de l'Énergie et des Ressources (MER) 1983.** Compilation de la géologie du Quaternaire (1: 50 000). Service de la géoinformation, Gouvernement du Québec.

**Ministère des Ressources Naturelles (MRN) et Faune et Parcs 2000.** Orthophotos, format numérique, Gouvernement du Québec.

**Nielsen E., McKillop B. et Conley G. G. 1993.** Fluvial sedimentology and paleoecology of Holocene alluvial deposits. *Géogr. phys. Quat.*, 47: 193-210.

**Oetelaar G. A. 2002.** River of change: a model for the development of terraces along the Bow river. *Géogr. phys. Quat.*, 56: 155-169.

**Parent M. 1977.** Contribution à l'étude de la déglaciation wisconsinienne dans le centre des Cantons de l'Est, Québec. *Géogr. phys. Quat.*, 21: 217-228.

**Phillips J. D. 2004.** Geogenesis, pedogenesis, and multiple causality in the formation of texture-contrast soils. *Catena*, 58: 275-295.

**Ritter D. F., Kinsey W. F., Kauffman M. E. 1973.** Overbank sedimentation in the Delaware river valley during the last 6000 years. *Science*, 179 : 374-375.

**Saint-Laurent D. et Lavoie L. 2004.** Les différentes approches méthodologiques de reconstitution des paléo-inondations: une revue de la littérature. *Rev. Sci. Eau*, 17 : 93-117.

**Saint-Laurent et Saucet J.-P. 2003.** Chronological reconstitution of floods of the Saint-François Drainage Basin, Québec, Canada. *Proceedings 3<sup>rd</sup> Canadian Conference on Geotechnique and Natural Hazards*, Edmonton, Alberta, June, 9-10, 2003.

**Saint-Laurent et Couture C., McNeil E. 2001.** Spatio-temporal analysis of floods of the Saint-François drainage basin, Québec, Canada. *Environments*, 23: 73-89.

**Stuiver M., Reimer P. J., Bard E., Beck J. W. et Burr G. S. 1998.** INTCAL98 radiocarbon age calibration, 24,000-0 cal BP. *Radiocarbon*, 40: 1041-1083.

**Taylor M. P. et Brewer P. A. 2001.** A study of Holocene floodplain particle size characteristics with special reference to paleochannel infills from the upper Severn basin, Wales, UK. *Geol. J.*, 36: 143-157.

**Williams G. P. et Costa J. E. 1988.** Geomorphic measurements after a flood. Pages 65-77 *in* V.R. Baker, R.C. Kochel et P.C. Patton, eds. Flood geomorphology. Wiley (Wiley-Interscience Publication), New York, USA.

**Wolman M. G. et Leopold L. B. 1957.** River floodplains : Some observations on their formation. U.S. Geol. Surv. Profess. Pap., 282-C, 87-109.

**Yeomans J. C. et J. M. Bremner 1988.** A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. Comm. Soil Sci. Plant Ana., 19 : 1467-1476.

**Tableau 2.1** Composition texturale et analyses chimiques des échantillons de sols à différentes stations.

Station d'échantillonnage	Horizon	Profondeur (cm)	Texture du sol	pH	C.O.	Al	Fe	Al+Fe
				CaCl <sub>2</sub>	%	%	%	%
SNI-1	C1	25	Limon sableux fin	-	-	-	-	-
SNI-1	C4	75	Limon sableux fin	-	-	-	-	-
AVE-9	C1	40	Limon sableux très fin	6,22	2,05	0,1	0,3	0,4
AVE-9	C4	100	Sable limoneux très	5,94	0,64	0,08	0,27	0,35
WIN-10	C1	10	Limon sableux très fin	-	-	-	-	-
WIN-10	Bfj1	75	Sable limoneux fin	5,42	1,81	0,11	0,37	0,48
WIN-10	C4	150	Limon limoneux	5,45	2,64	0,12	0,33	0,45
SAU-11	Bfj1	25	Sable moyen	4,89	3,16	0,13	0,45	0,58
SAU-11	Bfj3	75	Sable moyen	4,88	2,1	0,09	0,34	0,43
BRO-18	C1	25	Limon sableux très fin	6,13	1,73	0,1	0,32	0,42
BRO-18	C2	75	Limon sableux très fin	5,89	1,6	0,11	0,37	0,48
STO-19	Bfj	25	Limon sableux très fin	4,71	1,48	0,19	0,56	0,75
STO-19	C3	75	Limon sableux très fin	4,88	1,16	0,12	0,42	0,54
RIC-20	C1	10	Limon sableux fin	-	-	-	-	-
WIN-5	C1	25	Limon sableux	5,32	1,92	0,11	0,31	0,42
WIN-5	C3	75	Limon sableux	5,8	1,39	0,08	0,27	0,35
MAS-12	C2	25	Limon sableux fin	-	-	-	-	-
MAS-13	C1	10	Limon sableux très fin	-	-	-	-	-
MAS-13	C2	25	Limon	4,67	1,59	0,14	0,53	0,67
MAS-13	IIBfj3	85	Sable limoneux fin	4,61	1,17	0,16	0,3	0,46
LEN-17	C1	25	Limon sableux très fin	5,51	2,16	0,1	0,29	0,39
LEN-17	C2	75	Limon sableux très fin	5,39	0,86	0,1	0,34	0,44
EAT-7	C3	25	Sable fin	-	-	-	-	-
EAT-7	C5	75	Sable limoneux très	-	-	-	-	-
EAT-8	C2	25	Limon sableux fin	5,35	1,32	0,11	0,37	0,48
EAT-8	IICb1	75	Sable moyen	5,37	0,55	0,1	0,29	0,39
EAT-8a	C1	10	Limon	5,83	1,57	0,06	0,2	0,26
EAT-8a	Cgb1	75	Sable limoneux fin	5,9	1,14	0,06	0,23	0,29
EAT-8a	IICgb1	85	Sable limoneux	5,3	0,69	0,08	0,28	0,36
EAT-8a	IICgb2	95	Sable limoneux très	5,3	0,38	0,07	0,33	0,4
EAT-8a	IIICgb1	100	Lit de gravier	5,78	0,45	0,07	0,27	0,34
EAT-16	C1	25	Sable limoneux fin	6,31	0,92	0,06	0,19	0,25
EAT-16	C1	75	Sable limoneux fin	6,02	0,65	0,05	0,16	0,21

Note: le signe ( - ) signifie que les analyses chimiques n'ont pas effectuées pour ces échantillons.

**Tableau 2.2** Composition texturale et nature des dépôts meubles des stations d'observation.

Station	Profondeur (cm)	Classe texturale	Dépôt meuble	UTM	
SNIO-1	>80	sable grossier	fluvatile	5080275	709526
SNIO-2	100	sable grossier	fluvatile	5077302	710089
SNIO-3	60	sable grossier	fluvatile	5079975	708386
SNIO-3	>60	sable-argileux	fluvatile	5079975	708386
SNIO-4	100	sable moyen à fin	fluvatile	5080015	708421
SNIO-5	75	sable moyen à fin	fluvatile	5078856	712003
SNIO-6	>150	limon sableux fin	fluvatile	5077833	710235
SNIO-7	30	limon fin	fluvatile	5077104	710659
SNIO-7	>30	gravier	fluvatile	5077104	710659
SNIO-8	150	sable	fluvatile	5075419	711509
SNIO-8	>150	gravier	fluvatile	5075419	711509
ULVO-9	80	limon sableux fin	fluvatile	5068719	714959
ULVO-9	>80	sable moyen	fluvatile	5068719	714959
RICO-10	50	limon	glacio-lacustre	5058748	722852
RICO-10	>50	sable limoneux	glacio-lacustre	5058748	722852
RICO-11	50	limon	glacio-lacustre	5058830	722796
RICO-11	>50	sable limoneux	glacio-lacustre	5058830	722796
RICO-12	100	limon	fluvatile	5057651	724107
WINO-13	>75	limon	remblai	5051640	732963
WINO-14	>80	limon	fluvatile	5053234	731390
WINO-15	>80	limon	fluvatile	5053788	729960
WINO-16	50	limon	fluvatile	5053783	729920
WINO-16	>50	sable fin	fluvatile	5053783	729920
WINO-17	>100	limon argileux	glacio-lacustre	5048377	734238
STOO-18	>50	limon sableux fin	fluvatile	5042487	736954
STOO-19	50	limon sableux fin	fluvatile	5043581	735770
STOO-20	>60	limon sableux	glacio-lacustre	5045275	735298
WINO-25	75	limon	fluvatile	5056358	725728
MASO-21	>100	limon	fluvatile	5021290	742035
MASO-22	>100	limon très fin	fluvatile	5021332	742032
MASO-23	130	limon	fluvatile	5024237	744216
MASO-23	>130	sable	fluvatile	5024237	744216
MASO-24	>100	limon	fluvatile	5025249	745099
MASO-26	100	limon sableux	remblai	5028565	746635
MASO-26	>100	gravier	remblai	5028565	746635
MASO-27	>100	limon fin	fluvatile	5021619	431117

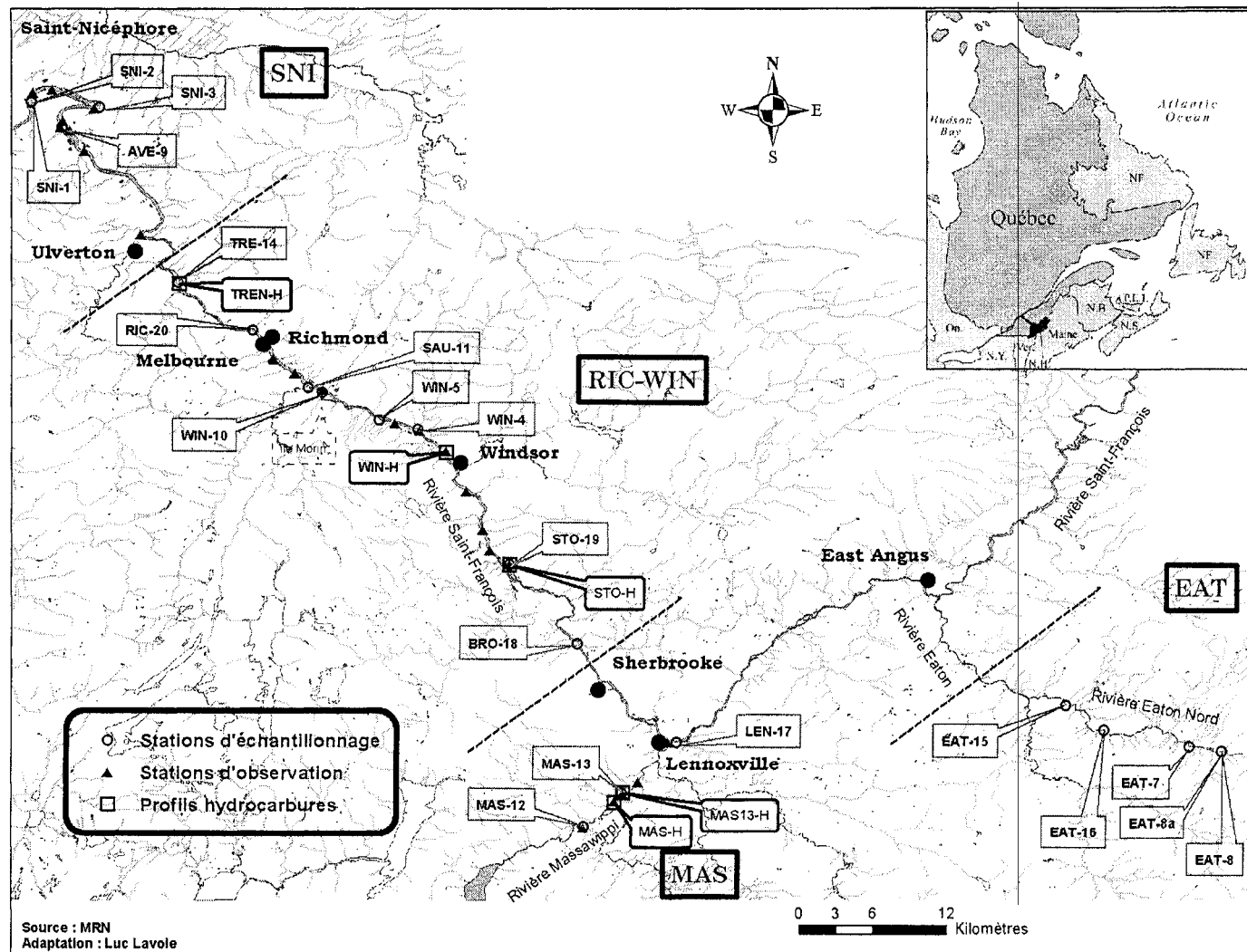
**Tableau 2.3** Évaluation des taux de sédimentation pour les différents secteurs d'étude.

Station	Épaisseur des sédiments (cm)	Type de matériel <sup>1</sup>	Âge <sup>14</sup> C	Âge calendrier 2 <i>sigma</i>	Âge calendrier médian	Taux de sédimentation moyen (cm a <sup>-1</sup> )	UTM	
SNI-1 (O2)	124	m.o.	70±60	1802-1939 AD	1870	0,93	5079351	708379
SNI-2	123	m.o.	140±60	1792-1951 AD	1871	0,93	5079269	708384
SNI-3	90	m.o.	70±60	1802-1939 AD	1870	0,68	5079025	712280
RIC-20	155	m.o.	160±70	1650-1952 AD	1801	0,77	5061381	721673
WIN-5	135	m.o.	200±60	1631-1900 AD	1765	0,57	5053975	729071
EAT-7	141	m.o.	30±70	1802-1938 AD	1870	1,06	5029397	776703
EAT-8a	45	m.o.+c.b.	270±70	1391-1644 AD	1517	0,09	5029135	778510
EAT-8a	80	m.o.	440±80	1447-1694 AD	1570	0,18	5029135	778510
EAT-16	110	m.o.	60±60	1802-1938 AD	1870	0,83	5030352	771634

1: m.o.: matière organique ; c.b.: charbon de bois.



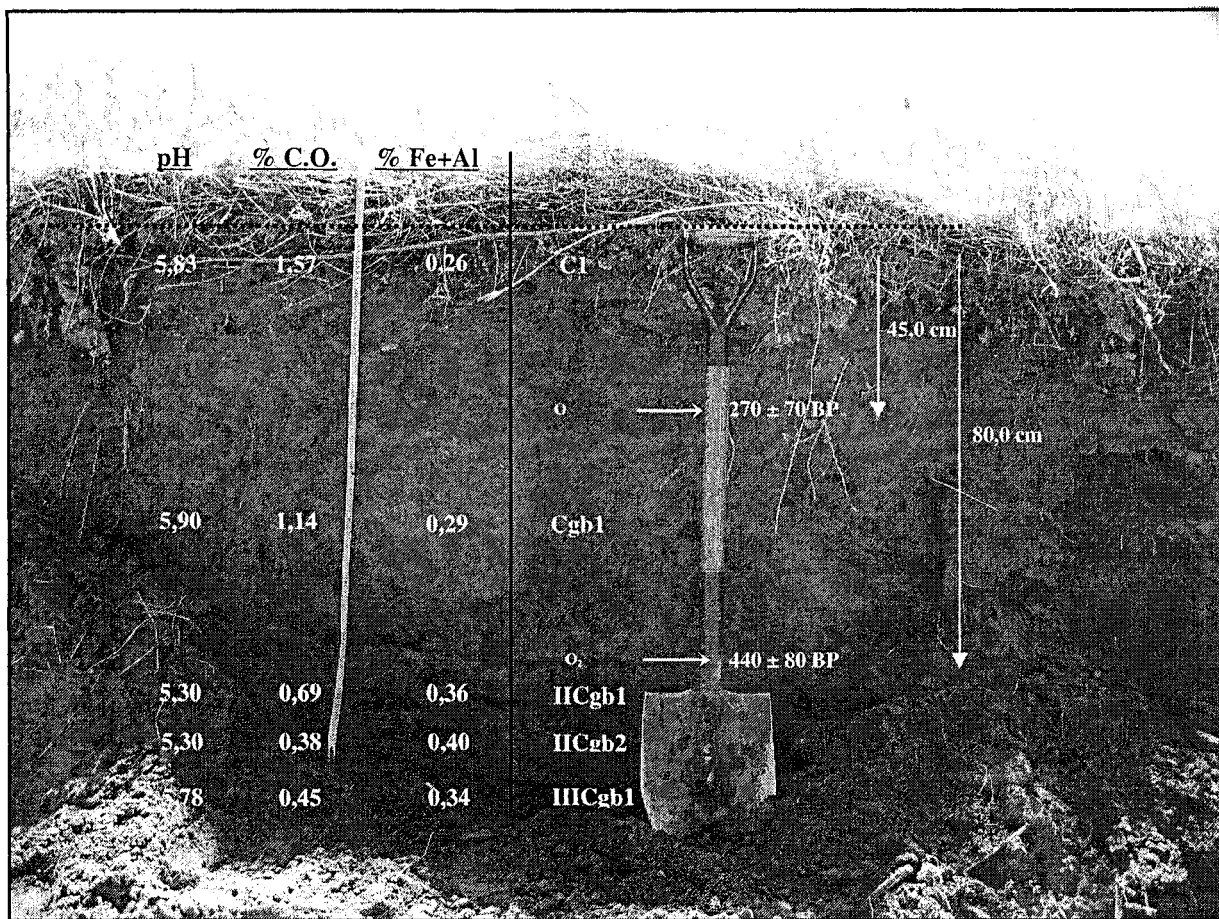
**Figure 2.1** Localisation des stations d'échantillonnage et d'observation dans les différents secteurs d'étude (SNI, RIC-WIN, MAS et EAT). Les profils de sols contenant des couches contaminées sont aussi indiqués.





**Figure 2.2** Site typique des plaines alluviales de la rivière Saint-François (secteur RIC-WIN). On peut voir l'accumulation récente des sédiments de crues (1,5 à 3,5 cm) déposés lors d'une crue printanière (05/05/2003).

**Figure 2.3** Exemple d'un profil de sol typique localisé dans le secteur Eaton Nord (EAT 8a). On peut noter la forte homogénéité des sédiments de crues et aussi la présence d'horizons organiques discontinus.



0 - 20,0 cm

C1

Limon; gris-brun foncé (10YR 4/2h); racines très nombreuses.

20,0 - 45,0 cm

C2

Sable limoneux fin; brun foncé (10YR 3/3h); racines nombreuses.

45,0 - 46,0 cm

O1

46,0 - 80,0 cm

Cgb1

Sable limoneux fin; brun foncé (10YR 3/3h ); racines nombreuses; marbrures peu

80,0 - 82,0 cm

O2

82,0 - 91,0 cm

IICgb1

Sable limoneux; gris-brun (10YR 4/2,5h).

91,0 - 101,0 cm

IICgb2

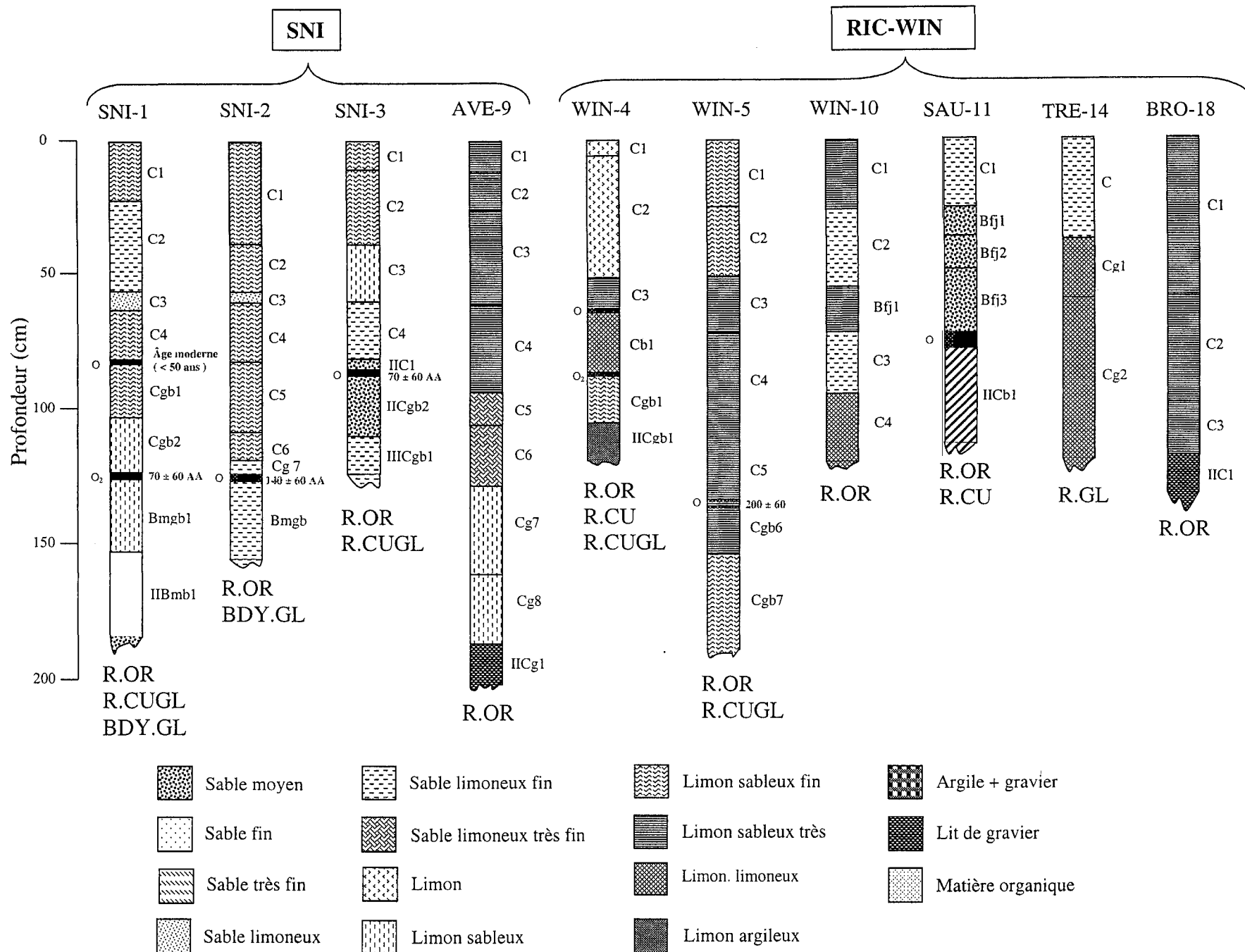
Sable limoneux très fin; gris-brun foncé (10YR 4/2h); marbrures peu nombreuses.

101,0 cm ++

IIICgb1

Sable limoneux très fin; brun-jaune foncé (10YR 3/4h ).

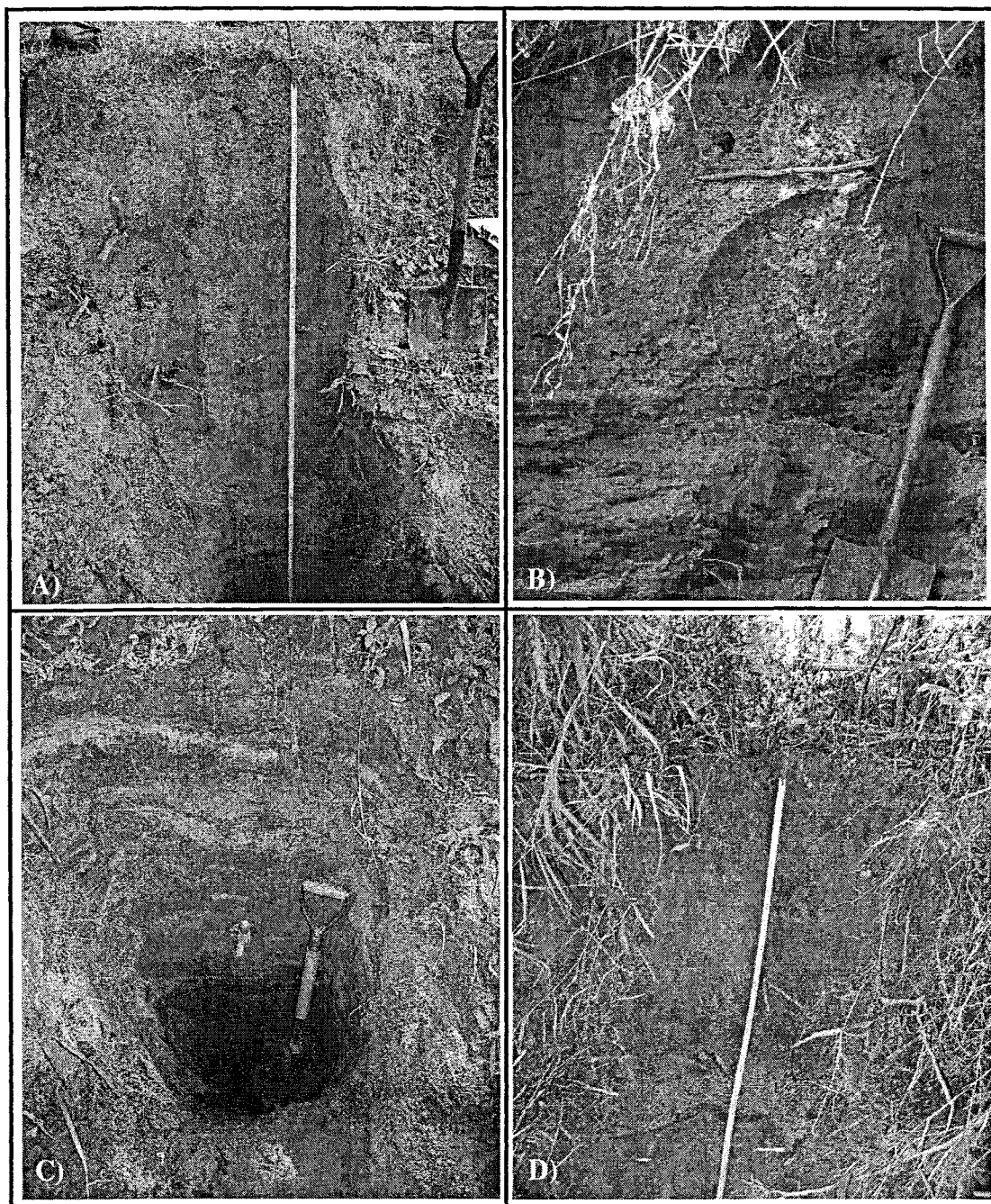
**Figure 2.4** Représentation schématique des profils de sols des stations d'échantillonnage (secteurs SNI et RIC-WIN).



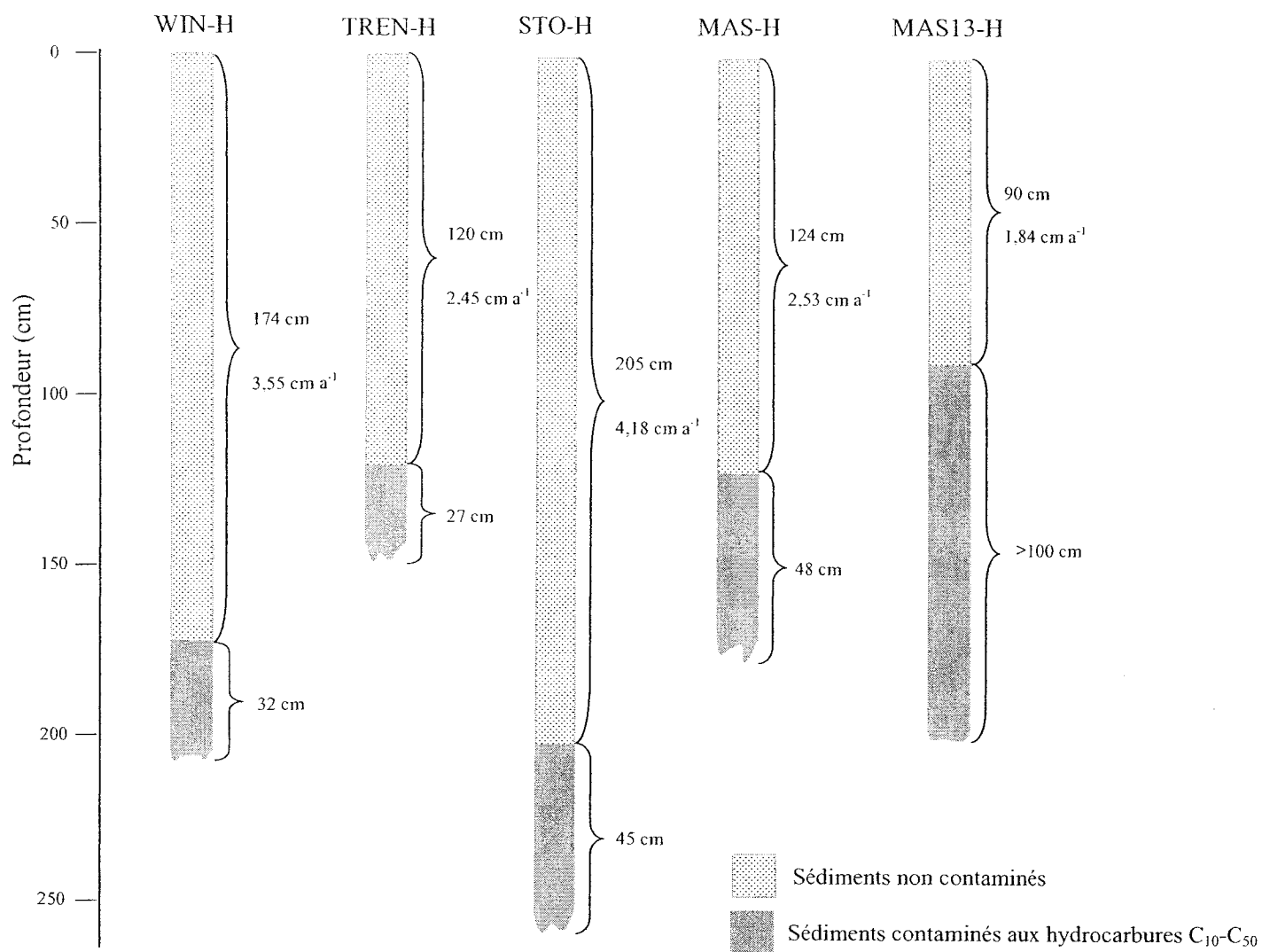
**Figure 2.5** Représentation schématique des profils de sols des stations d'échantillonnage (secteurs RIC-WIN, MAS et EAT).







**Figure 2.6** Profils des sols et paléosols localisés dans les différents secteurs d'étude (A: secteur SNI; B: RIC-WIN; C: MAS; D: EAT).



**Figure 2.7** Schéma des profils de sols montrant l'accumulation des sédiments de crues sus-jacents les couches contaminées aux hydrocarbures C<sub>10</sub>-C<sub>50</sub>.

### CHAPITRE III

## ÉDIFICATION DES PLAINES ALLUVIALES ET RÉCURRENCE DES INONDATIONS DES BASSINS DU CENTRE-SUD DU QUÉBEC (CANADA)

Luc Lavoie<sup>1</sup>, Diane Saint-Laurent<sup>2</sup> et Julien St-Laurent<sup>2</sup>

Université du Québec à Trois-Rivières

<sup>1</sup> Chimie-Biologie, C.P. 500, Trois-Rivières, Québec, G9A 5H7

<sup>2</sup> Géographie, C.P. 500, Trois-Rivières, Québec, G9A 5H7

Téléphone : (819) 376-5011 (poste 3674), télécopieur : (819) 376-5179

<sup>2</sup> Adresse de correspondance : Courriel : [diane\\_saint-laurent@uqtr.ca](mailto:diane_saint-laurent@uqtr.ca)

## RÉSUMÉ

Cet article présente une analyse sur la dynamique fluviale responsable de l'édification des plaines alluviales et de la formation des sols évoluant dans les zones d'alluvionnement. La région d'étude couvre les bassins et sous-bassins du centre sud du Québec affectés par des inondations périodiques. L'analyse des profils étudiés révèle un faible développement pédogénétique (faible horizonation, absence d'horizon organo-minéral (Ah) et d'horizon illuvial (B), altération réduite). Ces sols faiblement développés ont été classés parmi les ordres régosoliques et brunisoliques (SCCS, 2002). Au niveau des caractéristiques granulométriques et sédimentologiques, les profils de sol présentent des faciès relativement homogènes et sans grande variabilité des classes texturales. Ce sont essentiellement des matrices fines qui dominent avec des proportions importantes de limons ou de sable limoneux. L'analyse des plaines alluviales des différents secteurs d'étude révèle une sédimentation constante liée à la fréquence élevée des inondations de ce bassin hydrographique. Les taux de sédimentation évalués à partir des datations  $^{14}\text{C}$  et des accumulations alluvionnaires se situent entre 0,09 et 1,06 cm a<sup>-1</sup> suivant les secteurs d'étude. L'évaluation des taux de sédimentation obtenue à partir d'autres paramètres (réurrences d'inondation, couches contaminées) fournissent des valeurs de l'ordre de 3,46 à 5,42 cm par événement d'inondation. Ces importantes accumulations qui entraînent un rehaussement des plaines alluviales et aussi les caractéristiques des sols alluviaux suggèrent que la fréquence des inondations serait en hausse depuis le début du siècle et plus particulièrement depuis les dernières décennies.

**Mots clés :** dynamique fluviale, sols alluviaux, taux de sédimentation, édification des plaines alluviales, récurrence d'inondation.

## Abstract

This article presents an analysis concerning the fluvial dynamic responsible of the aggradation rates and pedogenesis processes observed in alluvial terraces. The study area covers the basins and sub-basins of the south-central Québec affected by periodic floods. The analysis of soil profiles reveals a weak pedogenesis development (weak horizonation, absence of organo-mineral (Ah) and illuvial horizons (B), weak alteration). These soils weakly developed were classified among the regosolic and brunisolic orders (CSSC, 2002). For textural and sedimentological characteristics, the soil profiles present relatively homogeneous facies and weak textural classes variability. They are essentially fine matrix dominate with important proportion of silt or silty sand. The analysis of alluvial terraces reveals an important sedimentation rates connected to high frequency of floods that characterize this hydrographic basin. The sedimentation rates estimated from radiocarbon-14 dating and alluvial deposits are ranges from 0.09 to 1.06 cm a<sup>-1</sup> depending on the study sectors. The evaluation of the sedimentation rates obtained from other parameters (flood recurrences, contaminated layers) supply values from 3.46 to 5.42 cm by flood events. These important accumulation of sediments which causes substantial increases in terrace levels and also the characteristics of soil profiles suggest that the frequency of floods would be in increase since the beginning of century and more particularly for the last decades.

**Key words:** fluvial dynamic, alluvial soils, sedimentation rate, aggradation of alluvial plain, flood recurrences.

## INTRODUCTION

Il existe un nombre considérable de travaux sur la dynamique fluviale et l'évolution des environnements fluviaux. Parmi les sujets traités, mentionnons les travaux sur le transport des charges sédimentaires, les processus de sédimentation et d'érosion, la stratigraphie des plaines alluviales ou encore les variations des écoulements saisonniers et interannuels (Wolman et Leopold 1957; Ritter *et al.*, 1973; Scully et Arnold, 1981; Krauss et Bown, 1986; Brakenridge, 1988; Komar, 1988; Williams et Costa, 1988; Magilligan, 1992; Anderson *et al.*, 1996; Taylor et Brewer, 2001; Brooks, 2002; Oetelaar, 2002; Saint-Laurent *et al.*, 2002). On compte également un certain nombre de travaux sur l'analyse et la caractérisation des sols alluviaux et l'étude géomorphologique des plaines alluviales (Krauss et Bown, 1986; Aslan et Autin, 1998; Bull, 1990; Klawon *et al.*, 2000; Daniels, 2003). Ces dernières études utilisent différents paramètres morpho-pédologiques afin de comprendre la dynamique fluviale qui dépend elle-même des facteurs climatiques et anthropiques qui influent sur les variations du régime hydrologique. L'utilisation des paramètres pédogénétiques et sédimentologiques apparaît souvent d'ailleurs indissociables pour comprendre la dynamique et l'évolution des systèmes fluviaux (Autin *et al.*, 1998). Les sols et les paléosols enfouis dans les plaines alluviales fournissent notamment des indications sur les phases plus ou moins longues de stabilisation, en considérant le développement pédogénétique des sols *in situ* par exemple (Bull, 1990; Aslan et Autin, 1998; Daniels, 2003), alors que les faciès sédimentologiques et l'utilisation des méthodes de datation renseignent sur le mode de déposition, l'âge et le développement des plaines (Williams et Costa, 1988; Taylor *et al.*, 2001; Brooks, 2002; Oetelaar, 2002). En somme, la description morphologique des sols et leur degré de maturité constituent des indices pédogénétiques fort utiles pour comprendre les processus d'édification des plaines alluviales soumises à des crues successives. L'importance d'utiliser une approche géopédologique (*sensu* Phillips, 2004) apparaît fort utile pour saisir la dynamique et l'évolution des différents systèmes fluviaux. Il faut

souligner toutefois que la principale difficulté dans l'interprétation des séquences sédimentologiques réside dans l'identification (ou l'individualisation) de chaque événement d'inondation (Saint-Laurent et Lavoie, 2004). La superposition de plusieurs inondations successives sur une courte période de temps (échelle décennale par exemple) rend en effet difficile de discriminer chaque événement d'inondation, notamment en raison de la faible différenciation des faciès sédimentologiques et texturaux des séquences. Il devient donc nécessaire de considérer différents paramètres morphométriques pour tenter de reconstituer le mieux possible les phases d'alluvionnement associées aux crues. Dans le cadre de cette étude, nous cherchons à utiliser une approche géopédologique en combinant différents paramètres pédologiques (granulométrie, horizonation, pH, C.O.%, teneur des sesquioxydes, etc.), afin de mieux comprendre le développement des sols soumis à une dynamique fluviale associée à des récurrences d'inondation, tout en mettant en parallèle l'utilisation de paramètres sédimentologiques (nature des sédiments, faciès de déposition, datation radiocarbone, etc.). Dans un deuxième temps, nous avons tenté d'évaluer l'importance des phases d'inondation dans l'édification des plaines alluviales à partir d'une estimation des taux de sédimentation en combinant différents paramètres (récurrence des inondations, couches contaminées, etc.). Notre hypothèse de départ assume que les plaines alluviales de la région d'étude sont soumises à des phases d'alluvionnement importantes qui seraient attribuables à une augmentation des inondations depuis les dernières décennies, en particulier après les années 1970 (Saint-Laurent et Saucet, 2003). Pour réaliser cette étude, nous avons choisi la région hydrographique 02 (Environnement Canada, 2002) qui regroupe les rivières des bassins et sous-bassins du centre-sud du Québec, lesquelles rivières sont soumises à des inondations périodiques. L'étude conjointe entre l'analyse des sols alluviaux et la formation des plaines permettra de mieux saisir la dynamique fluviale qui caractérise cette région hydrographique.

## Localisation et secteurs d'étude

La région d'étude occupe le centre-sud du Québec qui regroupe un ensemble de bassins et sous-bassins drainés par les rivières Saint-François, Massawippi, Magog, Au Saumon et Eaton principalement. L'ensemble de ce bassin hydrographique couvre une superficie de 10 221 km<sup>2</sup> qui s'étend des Basses-Terres du Saint-Laurent jusqu'au plateau appalachien. La rivière Saint-François forme le cours d'eau principal prenant sa source dans les lacs réservoirs Aylmer et Saint-François et puis se déverse dans le fleuve Saint-Laurent à la hauteur de Notre-Dame-de-Pierreville. La partie amont du bassin située dans la chaîne des Appalaches est caractérisée par un relief montagneux où dominant surtout les activités agroforestières, alors que la partie aval qui s'étend du piedmont aux Basses-Terres du Saint-Laurent se caractérise davantage par l'agriculture intensive et les activités urbaines et industrielles. Pour cette étude, la région a été divisée en quatre secteurs qui regroupent le cours moyen de la rivière Saint-François (secteurs Saint-Nicéphore et Richmond-Windsor), la rivière Massawippi (secteur Massawippi) et la rivière Eaton (secteur Eaton Nord), reprenant ainsi les limites des bassins délimités par le MEF (1992). La compilation des données numériques à partir des cartes du MFQ (1993) a permis de représenter de façon plus précise la répartition des dépôts de surface suivant les secteurs d'étude (tableau 3.1). Ainsi, les berges du secteur Saint-Nicéphore (SNI) s'étendent sur une longueur totale de 57,5 km et sont formées de dépôts fluviaux sur plus de 60% du tronçon, considérant les deux rives (tableau 3.1; figure 3.1). La section moyenne de ce tronçon se distingue par une plaine inondable très large, constituée essentiellement de dépôts fluviaux. Les berges du secteur Richmond-Windsor (RIC-WIN) s'étendent sur une longueur de 104,3 km, soit pratiquement le double du secteur précédent (tableau 3.1; figure 3.1). Celles-ci sont constituées en majorité de dépôts fluviaux (42 %), ensuite ce sont les dépôts glacio-lacustres (22,5%) qui dominent. Mentionnons que les affleurements rocheux en amont et en aval de la ville de Richmond apparaissent à divers endroits le long de la rive



et forment probablement une bonne partie du lit de la rivière. Les berges du secteur Massawippi (MAS) s'étendent sur une longueur totale de plus de 37 km et les dépôts fluviaux composent plus de 66% des rives de ce secteur (tableau 3.1; figure 3.2). Enfin, le secteur de la rivière Eaton Nord (EAT) s'étend sur une longueur totale de 62,2 km et plus de 80% des deux rives sont formées de dépôts d'origine fluviale (tableau 3.1; figure 3.2). Le reste du tronçon est constitué de tills indifférenciés (10,6%) et des dépôts glacio-lacustres (7,4%).

## MÉTHODES

### Échantillonnage et description morphologique des sols

Les stations d'échantillonnage et d'observation ont été choisies le long des plaines inondables des rivières Saint-François, Massawippi, Eaton et Au Saumon, lors des campagnes de terrain de 2002 et 2003. Les stations sélectionnées occupent les zones de récurrence de 0-20 et 20-100 ans identifiées sur les cartes du risque d'inondation (Environnement Canada et MENV, 1982). L'embouchure des tributaires qui constitue des milieux propices à l'accumulation sédimentaire et susceptible de contenir des horizons organiques (Baker *et al.*, 1988), a aussi été visitée lors des campagnes de terrain. Toutefois, les coupes réalisées à ces endroits n'ont pas permis de trouver d'horizons organiques enfouis. Enfin, les zones trop perturbées ou urbanisées, soit entre 2,9 à 9,2% suivant les secteurs (tableau 3.1; figures 3.1 et 3.2), n'ont pas été retenues dans le choix des stations. Au total, 47 stations ont été sélectionnées le long des plaines, dont 20 sont des stations d'échantillonnage comprenant une description complète des profils de sol, et 27 autres des stations d'observation permettant d'identifier les sédiments de surface (1 mètre de profondeur). Pour chacune des stations d'échantillonnage, une coupe transversale a été effectuée ainsi qu'une description morphologique détaillée du pédon selon les critères du Système canadien de classification des sols (SCCS)

(Groupe de travail sur la Classification des sols (GTCS) 2002). Chacune des stations a été localisée à l'aide d'un GPS Garmin E-TREX et ensuite positionnée sur les orthophotos (MRN, 2000) des différents secteurs d'étude (figures 3.3 et 3.4).

### **Analyses physico-chimiques et datation radiocarbone**

Pour les analyses physico-chimiques, des horizons de sol ont été échantillonnés à des profondeurs déterminées (10, 25 et 75 cm) pour l'ensemble des profils des stations d'échantillonnage. Dans un premier temps, les échantillons de sol minéral ont été séchés à l'air et tamisés à 2 mm. Le dosage des sesquioxides de Al et de Fe extractibles au pyrophosphate de sodium a été effectué selon la méthode de McKeague (1978) pour des profondeurs de sol de 25 et 75 cm. Une fraction de ces mêmes échantillons a servi à déterminer la concentration en carbone organique totale (C.O.%) selon la méthode de Yeomans et Bremner (1988). Enfin, le pH ( $\text{CaCl}_2$ ) a été mesuré à l'aide d'un rapport sol : solution de 1 : 2. En ce qui a trait aux analyses granulométriques, les échantillons prélevés dans les sols ont été analysés suivant les classes texturales du SCCS (2002). L'ensemble des analyses physico-chimiques a été effectué par des laboratoires universitaires ou des laboratoires spécialisés. Pour les profils de sols contenant des horizons organiques (O) enfouis dans les plaines alluviales, des datations radiocarbone ( $^{14}\text{C}$ ) ont été effectuées et converties en âge calendrier (Stuiver *et al.*, 1998). Les horizons organiques composés principalement de fragments végétaux ont été recensés dans 12 des 21 stations d'échantillonnage. Dix de ces horizons ont pu être datés (laboratoire de radiochronologie, Université Laval), les deux autres n'ont pu fournir aucun résultat en raison de la trop faible quantité de matière organique disponible. Pour les horizons organiques contenant suffisamment de matière organique, ceux-ci ont été l'objet d'un tri en laboratoire afin de prélever les divers macrorestes. Au total, sept échantillons ont été soumis en laboratoire pour des fins d'identification (tableau 3.2). Enfin, la présence de couches

contaminées (hydrocarbures  $C_{10}$ - $C_{50}$ ) dans 5 coupes réalisées le long des berges des secteurs RIC-WIN et MAS ont été utilisées comme autre repère chronologique dans l'évaluation de l'apport sédimentaire pour ces deux secteurs spécifiques. L'estimation des taux de sédimentaire s'est basée sur la date présumée de la contamination (année 1955; Saint-Laurent et St-Laurent, 2004) et l'épaisseur des sédiments mesurés en 2004 (soit 49 ans) et l'épaisseur des sédiments sus-jacents les couches contaminées. L'emplacement des différents secteurs d'étude, les stations d'échantillonnage et d'observation, ainsi que la localisation des profils contenant des horizons organiques enfouis dans les profils apparaissent sur les figures 3.3 et 3.4.

### **Source des données historiques d'inondation et séries hydrologiques**

La recension des événements d'inondation a été réalisée à partir d'un ensemble de données provenant de diverses sources. Une première reconstitution des inondations a été compilée essentiellement à partir des fiches d'inondation et autres documents fournis par les directions régionales (DRMC, DRME) du ministère de la Sécurité publique et qui couvrent la période 1964-2000. La reconstitution des inondations antérieures à 1964 a été réalisée à partir de différents documents dont les rapports de la Commission des eaux courantes du Québec (période 1912-1952), la revue des différents journaux régionaux indexés par la Société d'histoire de Sherbrooke, la base de données du CIEQ (Centre interdisciplinaire des études québécoises – UQTR), ainsi que des monographies régionales. La recension complète des inondations couvre la période de 1864 à 2004. Pour l'analyse des séries hydrologiques, les données ont été compilées à partir des différentes sources gouvernementales disponibles qui couvrent la période de 1914-2004. Plus précisément, les bases de données utilisées proviennent d'Environnement Canada (Hydat, CD-Rom, 2002, version 2.02) et des registres hydrologiques du CEHQ (Centre d'expertise hydrique du Québec).

## RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

### Sols et paléosols des plaines alluviales

Les sols en surface ( $\pm 1$  mètre) ont été classés parmi les régosols orthiques et les régosols gleyifiés, à l'exception d'un brunisol dystrique orthique à la station EAT-15 (figure 3.5). Au niveau morphologique, les profils présentent des faciès de sols peu évolués (faible horizonation, absence d'horizon organo-minéral (Ah) et d'horizon illuvial (B), faible altération, etc.). L'absence d'horizon Ah dans ces sols, indicatif d'un faible développement pédogénétique, peut s'expliquer par l'absence ou la quasi-absence de biomasse en surface et par l'âge des sols alluviaux. La disponibilité des substances humiques et autres produits organiques permettant par migration la formation d'horizon organo-minéral, s'en trouve réduite par le faible enrichissement des litières. Par ailleurs, ces apports réduits en matière organique atténuent l'enrichissement du carbone organique dans le sol, comme en témoignent les faibles concentrations en C.O. (%) dans la majorité des profils (tableau 3.3). Les teneurs obtenues varient entre 0,55% et 3,16% avec une valeur moyenne de l'ordre de 1,55%. On note aussi un faible niveau d'altération chimique des horizons du sol généralisé pour l'ensemble des pédons. Les taux de sesquioxydes de Al + Fe (%) obtenus à différentes profondeurs du profil (25 et 75 cm) sont généralement faibles, soit un taux moyen de 0,45% (tableau 3.3). Enfin, les horizons de sol analysés sont peu acides en général. Les valeurs de pH varient entre 4,61 et 6,31 avec une valeur moyenne de 5,44. Dans un même profil, on notera que les valeurs de pH restent relativement constantes de la surface en profondeur. La faible acidité de ces sols peut s'expliquer en partie par l'apport réduit des substances humiques, en raison notamment des minces litières qui caractérisent ces sols, sachant que les produits de la décomposition organique entraînent généralement une acidification du sol (Calvet, 2003). Il se peut aussi que les matériaux mis en place lors du transport fluvial (alluvions), soient généralement peu acides. Les

matériaux d'origine (sédiments fins surtout) ont probablement une concentration d'éléments calcaireux suffisamment élevée pour maintenir ces sols dans des pH neutres ou peu acides.

Parmi l'ensemble des paléosols analysés, 13 ont été classés parmi les régosols cumuliques et les régosols cumuliques gleyifiés et deux autres (SNI-1, SNI-2) ont été classés parmi les brunisols dystriques gleyifiés (figure 3.5). Ces sols se caractérisent également par un faible niveau de développement pédogénétique, bien que les horizons inférieurs des profils SNI-1 et SNI-2 soient plus altérés (présence d'horizon Bm). La présence d'horizons organiques de certains profils indique soit une certaine période de stabilisation ou une dynamique d'écoulement associée aux crues. Il est probable que la majorité des horizons organiques enfouis dans les profils résulte davantage du transport fluvial. Ces débris organiques souvent grossiers et peu décomposés (fragments de feuilles, brindilles, etc.) seraient transportés par le cours d'eau en crue et ensuite déposés sur le replat des plaines alluviales et progressivement enfouis par l'apport d'alluvions lors de débordements successifs. Les horizons organiques des profils des secteurs de SNI et RIC-WIN pourraient correspondre à ce mode de déposition, ce qui expliquerait que les datations radiocarbone indiquent des âges relativement jeunes. Dans le secteur EAT, les datations  $^{14}\text{C}$  obtenues indiquent généralement des âges plus anciens, en particulier le profil EAT-15 ( $2210 \pm 60$  ans BP). Dans ce cas, il est vraisemblable que le lit organique daté corresponde au replat de l'ancien niveau de la plaine alluviale. Enfin, la figure 3.6 présente un profil typique (EAT-8a) des sols alluviaux du secteur Eaton. La texture des horizons varie assez peu, passant des limons à des sables limoneux fins à très fins. Semblable aux autres profils, ce sol présente un faible développement pédogénétique (faible coloration, horizonation peu marquée, etc.) avec des taux réduits de sesquioxydes de Al et Fe (%) et des faibles concentrations de C organique (C.O.%). Ces concentrations diminuent progressivement de la surface vers la base du profil, passant de 1,57% à 0,45% (figure 3.6). Aussi, le sol est peu acide et les valeurs de pH

varient assez peu du haut vers la base du profil, soit entre 5,83 à 5,78. On peut noter la présence de deux minces horizons organiques discontinus (45 et 80 cm de profondeur), dont les écarts en âge radiocarbone sont de l'ordre 170 ans BP.

### **Composition texturale et taux sédimentaire**

Les coupes effectuées le long des plaines du secteur SNI ont permis de constater la présence d'alluvions fines sur plusieurs centimètres d'épaisseurs attribués à des sédiments de crues. Les sédiments fins (LSF, SLF, SLTF) sont présents parfois jusqu'à plus de 150 cm de profondeur (figure 3.5). On constate aussi que la fraction limoneuse est souvent dominante dans le premier mètre du solum. En profondeur, les textures varient très peu montrant une matrice quasi uniforme, et seules certaines coupes renferment de couches de sables moyens, indiquant des variations du régime fluvial lors de la déposition. Pour les stations d'observation, ce sont surtout les fractions sableuses qui dominent en surface des plaines (tableau 3.4). Pour le secteur SNI, quatre horizons organiques ont été datés et ceux-ci se situent à des profondeurs qui varient entre 84 et 124 cm (figure 3.5). Les datations  $^{14}\text{C}$  obtenues fournissent des âges relativement récents, soit entre un âge moderne ( $\pm 50$  ans BP) et  $140 \pm 60$  BP. En fonction des datations obtenues et des accumulations alluvionnaires mesurées, on évalue un taux sédimentaire variant entre 0,68 et 0,93 cm a<sup>-1</sup> suivant les profils (tableau 3.5). Considérant ces paramètres, on estime que les phases d'alluvionnement sont relativement importantes dans ce secteur et pourraient indiquer que la fréquence des inondations est en progression depuis le début du dernier siècle. Les coupes effectuées dans le secteur RIC-WIN (figures 3.3 et 3.4) présentent des caractéristiques semblables au secteur SNI. Les profils de sols sont caractérisés par une matrice relativement homogène composée surtout de sédiments fins (LSF, LSTF) (figures 3.5 et 3.7), à l'exception des stations SAU-11 et RIC-20 où la présence de lits sableux est notée. Pour les stations d'observation, ce sont aussi les limons ou les sables limoneux qui dominent (tableau 3.4). Pour ce secteur (RIC-WIN), les dates  $^{14}\text{C}$  obtenues

varient entre  $160 \pm 70$  BP (RIC-20) et  $200 \pm 60$  BP (WIN-5). En considérant les datations obtenues et l'épaisseur de sédiments accumulés au-dessus des horizons organiques, on évalue un taux sédimentaire de l'ordre de 0,57 et 0,77  $\text{cm a}^{-1}$ , soit des taux comparables à ceux obtenus pour le secteur SNI (tableau 3.5). Il faut noter que parmi les coupes effectuées le long des plaines, trois d'entre elles (TRE-14, WINO-13, STOO-19) renfermaient des couches contaminées (hydrocarbures  $\text{C}_{10}\text{-C}_{50}$ ). Ces dernières proviendraient fort probablement d'un déversement qui aurait eu lieu en octobre 1955 et dont le point d'origine serait à l'emplacement d'un ancien site minier aux abords de la rivière Massawippi (*cf.* Saint-Laurent et St-Laurent, 2004). La nappe polluante de ce déversement aurait suivi le courant sur près de 60 km pour atteindre la municipalité de Drummondville et aurait contaminé les sédiments d'un certain nombre de berges. En considérant les accumulations d'alluvions sus-jacentes ces couches contaminées, on estime un taux de sédimentation qui varient entre 2,45 et 4,18  $\text{cm a}^{-1}$ , ce qui confirme l'idée que les phases d'alluvionnement sont en progression depuis les dernières décennies et qu'elles seraient attribuables à une augmentation des inondations.

Les profils de sols du secteur Massawippi (MAS) s'apparentent aux autres secteurs quant aux caractéristiques texturales (tableau 3.4; figure 3.7). Les sédiments fins peuvent s'accumuler sur plus de 250 cm d'épaisseur le long des plaines et les faciès sédimentologiques sont généralement uniformes du sommet à la base du profil (figure 3.5). À la station MASO-26, on a observé toutefois un lit de graviers à plus d'un mètre de profondeur (tableau 3.4), ce qui pourrait correspondre au niveau de base. Aucun horizon organique n'a été trouvé dans ce secteur, par contre les profils MAS-12 et MAS-13 renferment des couches de sédiments contaminés, lesquelles ont servi également de repères chronologiques pour évaluer les taux de sédimentation. À l'emplacement du profil MAS-12, la couche contaminée est recouverte par 124 cm de sédiments, et au profil MAS-13, plus de 90 cm de sédiments recouvrent la couche contaminée. Si la date de l'événement de contamination est valide (soit 1955),

on peut estimer des taux sédimentaires de l'ordre de 2,53 et 1,84 cm a<sup>-1</sup> pour ces profils respectifs (tableau 3.5). Pour le secteur Eaton (EAT), les sols sont caractérisés par une matrice fine en surface ( $\pm 1$  mètre) et par des dépôts plus grossiers à la base des coupes (EAT-7 EAT-8a, EAT-15; figure 3.5). La présence des lits de graviers (présence de blocs aussi à la base des profils) correspondrait aux anciens niveaux de plaine alluviale. Il faut dire que le lit de la rivière Eaton Nord est peu profond à cet endroit ( $\pm 0,35$  m en moyenne) du tronçon. Le profil EAT-15 renfermait un lit organique daté de  $2210 \pm 60$  BP (figure 3.5) et celui du profil EAT-8a a fournit un date de  $440 \pm 80$  BP. Dans un profil situé non loin du profil EAT-8a (50 m en amont), une datation <sup>14</sup>C obtenue à partir de fragments organiques enfouis dans les sédiments a fourni un âge de  $765 \pm 40$  BP (*cf. Lamothe et al., 2000*). Considérant les différentes datations et l'épaisseur des sédiments accumulés sur les plaines alluviales, on estime un taux de sédimentation variant entre 0,09 et 1,06 cm a<sup>-1</sup> suivant les profils analysés (tableau 3.5), ce qui se compare aussi à ceux obtenus pour les autres secteurs, sauf pour le profil EAt-8a où les valeurs sont plus marginales.

### **Récurrence des inondations et édification des plaines alluviales**

L'étude des inondations des bassins du centre-sud du Québec a été l'objet de travaux récents qui montrent que la fréquence des inondations est en hausse depuis les trente dernières années (Jones, 1999; Saint-Laurent *et al*, 2001; Saint-Laurent et Saucet, 2003). Cette augmentation des inondations est attribuable à des facteurs climatiques (hausse des précipitations surtout entre les années 1975-1995), bien que les facteurs anthropiques soient aussi considérés comme un facteur d'aggravation de ce phénomène (*Ibid*, 2001). Cette hausse de la fréquence des inondations a été constatée aussi dans le reste du Canada surtout après les années 1970 (Tucker, 2000). Sans préciser la cause principale de cette augmentation des inondations, ce dernier auteur identifie autant les facteurs climatiques que les facteurs humains (occupation progressive des plaines inondables par exemple) comme responsables de la



hausse ou de l'aggravation des phénomènes des inondations. En examinant les figures 3.8 et 3.9, on note que la période suivant le début du siècle (1927-1942) et celle marquant la fin de cette période (1970-1998) ont été caractérisées par des années de forte hydraulité, en particulier pour les années 1927, 1928, 1936, 1939, 1942, 1976, 1982, 1994, 1996 et 1998. On notera que les années postérieures à 1970 sont caractérisées par une hausse des fréquences des débits maximums avec des pics centrées sur les années 1982, 1994, 1996 et 1998 (figure 3.9). Plusieurs de ces années sont d'ailleurs associées à des années de fortes inondations, en particulier les années 1982, 1996 et 1998, lesquelles ont affecté plusieurs rivières du bassin de la Saint-François (Saint-Laurent *et al.*, 2001; Saint-Laurent et Saucet, 2003).

On a tenté d'évaluer plus précisément les taux de sédimentation des plaines alluviales en tenant compte des récurrences des inondations pour la période historique de 1864-2004, période pour laquelle la recension des inondations du bassin a été réalisée (tableau 3.6). On dénombre 29 inondations pour le secteur SNI et 27 pour le secteur EAT pour cette période. Cinq profils de sols ont été retenus (SNI-1, SNI-2, SNI-3, EAT-7 et EAT-16) pour l'évaluation des taux sédimentaire correspondant à la période 1864-2004 (tableau 3.7). En considérant la fréquence des inondations et l'épaisseur des sédiments accumulés sur le replat des plaines alluviales, on obtient des taux de sédimentation variant entre 3,33 et 5,22 cm par événement d'inondations. Ces valeurs sont supérieures à celles obtenues à partir des datations radiocarbone converties en âge calendrier, mais comparables à celles obtenues à partir des couches de sédiments contaminés (tableau 3.5), ce qui porte à croire que l'estimation des taux sédimentaires effectuée à partir des couches contaminées est possiblement plus précise et pourrait aussi refléter une augmentation des inondations depuis les dernières décennies. Les observations faites sur les rives des rivières Saint-François, Massawippi et Coaticook lors de l'inondation du printemps 2003 (figure 3.10) indiquent que les accumulations d'alluvions peuvent varier en épaisseur entre 1,5 à 4,5 cm sur le replat de la terrasse (figure

3.10). En somme, lors des débordements, on peut s'attendre à des accumulations sédimentaires relativement variables mais qui avoisinent des valeurs moyennes de 2 à 3 cm d'épaisseur. Enfin, la figure 3.11 donne un aperçu du niveau atteint par la rivière Massawippi lors de son débordement au printemps 2003. Des fragments de feuilles accrochés aux branches des arbres sont situés à plus de deux mètres du niveau moyen de la rivière.

En tenant compte de l'ensemble des données recueillies, on constate que les plaines actuelles connaissent des phases d'alluvionnement qui s'expliquent par les apports constants de sédiments provenant des crues successives. Les sédiments transportés lors des crues se déposent sur le replat des plaines alluviales et entraînent progressivement leur rehaussement. L'un des indices les plus probants à l'édification verticale des plaines est la présence de couches contaminées enfouies dans les sédiments, lesquelles se situent à des profondeurs avoisinants les 170-200 cm dans certains profils. Comme cette contamination est un événement contemporain (année 1955), leur localisation dans le profil révèle l'importance des accumulations sédimentaires (alluvions) le long des plaines. On estime aussi que l'augmentation de la fréquence des inondations des dernières décennies explique les fortes accumulations mesurées le long des plaines, en particulier dans les secteurs SNI et RIC-WIN. On peut considérer aussi que le faible développement pédogénétique des sols en rive est une autre indication que cet environnement est soumis à des inondations périodiques.

## **CONCLUSION**

Les processus d'édification des plaines alluviales dans les bassins et sous-bassins du centre-sud du Québec résultent des récurrences d'inondation qui caractérisent cette région hydrographique. Dans les zones d'alluvionnement, les plaines sont composées essentiellement des sédiments fins (limons sableux fins à très fins, sable limoneux) avec des matrices relativement homogènes sur

l'ensemble des profils de sols. Quelques profils contenant des sédiments plus grossiers (sables grossiers ou graviers) à la base des coupes témoignent soit des variations du régime hydrologique ou correspondent à d'anciens niveaux. Le développement pédogénétique des sols des plaines alluviales est ralenti en raison des apports constants de sédiments transportés lors des crues successives. Ceci se traduit par l'absence d'horizons alluviaux et illuviaux bien définis, une faible altération chimique et des concentrations réduites de carbone organique *in situ*. En somme, les crues successives maintiennent les sols dans un état de rajeunissement. Les taux de sédimentation évalués à partir des différentes paramètres ( $^{14}\text{C}$ /âge calendrier, présence de couches contaminées, épaisseurs des accumulations et récurrence des inondations) suggèrent que les plaines alluviales sont soumises à des phases d'alluvionnement importantes qui seraient attribuables à une augmentation de la fréquence des inondations depuis les dernières décennies, en particulier après les années 1970. Ces années seraient d'ailleurs marquées par une hausse des précipitations qui se traduit par une plus forte hydraulicité (pics des débits maximums). Dans le contexte des changements climatiques actuels, il devient intéressant de suivre l'évolution de ces environnements dynamiques et de prévoir des mesures additionnelles de protection de ces milieux pour leur préservation et aussi pour la sécurité des riverains qui seront sans doute plus souvent affectés par les risques d'inondation.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) et l'UQTR pour les fonds institutionnels de recherche (FIR) pour le soutien financier à cette recherche. Nous tenons à remercier très sincèrement M. François Péloquin pour son aide soutenue lors les travaux de terrain. Nous voulons remercier également M. Alayn Larouche (Université de Montréal) pour son aide précieuse dans l'identification des macrorestes. Enfin, nous remercions sincèrement les

organismes suivants pour leur soutien dans l'utilisation de leurs bases de données, dont la Société d'histoire de Sherbrooke (SHS), le Centre interdisciplinaire des études québécoises (CIEQ-UQTR) et les directions régionales (DRMC et DRME) du ministère de la Sécurité publique.

## RÉFÉRENCES

- ANDERSON M.G., WALLING D.E. ET Bates P.D. (1996), *Flood-plain Processes*, Wiley, Chichester, 658 p.
- ASLAN, A. ET AUTIN, W.J. 1998, « Holocene flood-plain soil formation in the southern lower Mississippi Valley : implications for interpreting alluvial paleosols », *Geological Society of America Bulletin*, 110, pp. 433-449.
- AUTIN W.J., ASLAN A., BETTIS E.A. ET WALTHAL P.M. (1998), Report from working group on alluvial pedogenesis, Part V, Working Group Report, *Quaternary International*, 51/52, pp. 85-86.
- BAKER, V.R., KOCHER R.C. ET PATTON P.C. (1988), *Flood geomorphology*, Wiley (Wiley-Interscience Publication), New York, USA.
- BULL W.B. (1990), Stream-terrace genesis: Implications for soil development, *Geomorphology*, 3, pp. 351-367.
- BRAKENRIDGE G.R. (1988), *River flood regime and floodplain stratigraphy*, In Baker V.R., Kocher R.C. and Patton P.C. (eds.), *Flood geomorphology*, Wiley (Wiley-Interscience Publication), New York. USA, pp. 139-156.
- BROOKS G.R. (2002), « Floodplain chronology and vertical sedimentation rates along the Red River, southern Manitoba », *Géographie physique et Quaternaire*, 56, pp. 171-180.
- CALVET R. (2003). *Le sol – Propriétés et fonctions. Constitution et structure, phénomènes aux interfaces*, Éditions France Agricole, Tome 1, Dunod, 456 p.

DANIELS J.M. (2003), « Floodplain aggradation and pedogenesis in a semiarid environment », *Geomorphology*, 56, pp. 225-242.

ENVIRONNEMENT CANADA ET MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT (MENV) (1982), *Carte du risque d'inondation: Bassin de la rivière Saint-François (1: 10 000)*, Canada-Québec.

ENVIRONNEMENT CANADA, 2002. *Données hydrologiques*, Hydat CD-Rom, version 2.02, Canada.

GROUPE DE TRAVAIL SUR LA CLASSIFICATION DES SOLS (2002), *Le système Canadien de classification des sols*, 3<sup>e</sup> Édition. Direction générale de la recherche, Ministère de l'Agriculture et de Agro-Alimentaire du Canada, Publication 1646, Ottawa, 196 p.

JONES N.K. (1999), « A recent history of flooding in the Massawippi drainage basin », *Journal of Eastern Townships Studies*, 13, pp. 41-57.

KLAWON J.E., LEVISH D.R. ET O'CONNEL D.R.H. (2000), « Paleofloods and paleosols on the north Platte River, Stratigraphic records of exceedance and nonexceedance », *Geological society of America, Abstract*, 32, p. A-509.

KOMAR P.D. (1988), *Sediment transport by floods*, In Baker V.R., Kochel R.C. and Patton P.C. (eds.), *Flood geomorphology*, Wiley (Wiley-Interscience Publication), New York. USA, pp. 97-112.

KRAUSS M.J. ET BOWN T.M. (1986), *Paleosols and time resolution in alluvial stratigraphy*, In Wright V.P. (ed.), *Paleosols: Their Recognition and Interpretation*. Blackwell, Oxford, pp.180-207.

LAMOTHE M., RAMESEDER B., AUCLAIR M. ET HUOT S. (2000), *La stratigraphie du Quaternaire des bassins rivières Eaton et Saumon : Excursion géologique en Estrie*, IX<sup>e</sup> Congrès de l'AQQUA, Montréal, Livret-guide d'excursion, 42 p.

MAGILLIGAN F.J. (1992), « Sedimentology of a fine-grained aggrading floodplain », *Geomorphology*, 4, pp. 393-408.

MCKEAGUE J.A. (1978), « Manuel de méthodes d'échantillonnage et d'analyse des sols », *Société canadienne de la Science du sol*, (2<sup>e</sup> éd.), Ottawa, 267 p.

MINISTÈRE DES FORÊTS (MFQ) (1993), *Carte des dépôts meubles (1 : 50 000)*, Service des inventaires forestiers, Gouvernement du Québec.

MINISTÈRE DU DÉVELOPPEMENT DURABLE, DE L'ENVIRONNEMENT ET DES PARCS (2005), Centre d'expertise hydrique du Québec, Gouvernement du Québec, Québec,  
(<http://www.menv.gouv.qc.ca/cehq/>).

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE LA FAUNE (MEF) (1992), *La rivière Saint-François de 1976-1991*, Gouvernement du Québec, Québec.

MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES (MRN) ET FAUNE et PARCS (2000), *Orthophotos, format numérique*, Gouvernement du Québec.

OETELAAR G.A. (2002), « River of change: a model for the development of terraces along the Bow River », *Géographie physique et Quaternaire*, 56, pp. 155-169.

PHILLIPS J.D. (2004), « Geogenesis, pedogenesis, and multiple causality in the formation of texture-contrast soils », *Catena*, 58, pp. 275-295.

RITTER D.F., KINSEY W.F. ET KAUFFMAN M.E. (1973), « Overbank sedimentation in the Delaware river valley during the last 6000 years », *Science*, 179, pp. 374-375.

SAINT-LAURENT D. ET LAVOIE L. (2004), « Les différentes approches méthodologiques de reconstitution des paléo-inondations : une revue de la littérature », *Revue des Sciences de l'Eau*, 17, pp. 91-115.

\_\_\_\_\_ ET ST-LAURENT J. (2004), «*Evaluation of spatial distribution of contaminated sediments in Saint-François terraces, Québec, Canada*», The 15<sup>th</sup> Annual Conference of the International Environmetrics Society and the 6<sup>th</sup> International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences, (Abstracts & posters), June 28–July 1, 2004, Portland, Maine, USA.

\_\_\_\_\_ ET SAUCET J.-P. (2003), *Chronological reconstitution of floods of the Saint-François Drainage Basin, Québec, Canada*, Proceedings 3<sup>rd</sup> Canadian Conference on Geotechnique and Natural Hazards, Edmonton, Alberta, June, pp. 9-10, 2003.

\_\_\_\_\_ BÉRUBÉ M, THÉRIAULT I. ET LEMIEUX M. (2002), «Phénomènes d'érosion fluviale et conditions hydrodynamiques de la rivière Saint-Maurice, Québec, Canada», *BELGEO*, 2, 109-132.

\_\_\_\_\_ COUTURE C. ET MCNEIL E. (2001), « Spatio-temporal analysis of floods of the Saint-François drainage basin, Québec, Canada », *Environments*, 23, pp. 73-89.

SCULLY R.W. ET ARNOLD R.W. (1981), « Holocene alluvial stratigraphy in the Upper Susquehanna River Basin », New York. *Quaternary Research*, 15, pp. 327-344.



STUIVER M., REIMER P.J., BARD E., BECK J.W. ET BURR G.S. (1998), « INTCAL98 radiocarbon age calibration, 24,000-0 cal BP », *Radiocarbon*, 40, pp. 1041-1083.

TAYLOR M.P. ET BREWER P.A. (2001), « A study of Holocene floodplain particle size characteristics with special reference to paleochannel infills from the upper Severn basin », Wales, UK, *Geological Journal*, 3, pp. 143-157.

TUCKER C. (2000), « Floods in Canada : An emergency preparedness Canada (EPC) perspective », *Environments*, 28 , pp. 75-87.

WILLIAMS G.P. ET COSTA J.E. (1988), *Geomorphic measurements after a flood*, In Baker V.R., Kochel R.C. and Patton P.C. (eds.), Flood geomorphology, Wiley (Wiley-Interscience Publication), New York. USA, pp. 65-77.

WOLMAN M.G. ET LEOPOLD L.B. (1957), *River flood plains : some observations on their formation*, U.S. Geological Survey Professional Paper, 282-C: Washington D.C., pp. 87-109

YEOMANS J.C. ET BREMNER J.M. (1988), « A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil », *Soil Science Plant Annals*, 19, pp. 1467-1476.

**Tableau 3.1** Nature des dépôts de surface et leur répartition par secteurs d'étude (SNI, RIC-WIN, MAS et EAT).

Dépôts de surface	Secteur											
	SNI			RIC-WIN			MAS			EAT		
	Rive gauche (km)	Rive droite (km)	Total (km)	Rive gauche (km)	Rive droite (km)	Total (km)	Rive gauche (km)	Rive droite (km)	Total (km)	Rive gauche (km)	Rive droite (km)	Total (km)
Affleurement rocheux	-	-	-	0,5 (1,0%)	0,7 (1,3%)	1,2 (1,2%)	-	-	-	-	-	-
Fluvatile	19,9 (69,6%)	14,9 (51,4%)	34,8 (60,5%)	19,5 (37,3%)	24,2 (46,5%)	43,7 (42,0%)	11,0 (60,1%)	13,5 (72,0%)	24,5 (66,2%)	24,8 (79,9%)	26,2 (84,4%)	51,0 (82,0%)
Fluvio-glaciaire	6,1 (21,3%)	11,7 (40,3%)	17,8 (31,0%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Glacio-lacustre à faciès d'eau peu profonde	1,3 (4,7%)	-	1,3 (2,3%)	9,1 (17,4%)	14,4 (27,6%)	23,5 (22,5%)	5,9 (32,5%)	4,4 (23,6%)	10,3 (27,8%)	4,1 (13,1%)	0,5 (1,5%)	4,6 (7,4%)
Juxta-glaciaire	0,2 (0,8%)	-	0,2 (0,4%)	2,9 (5,6%)	2,6 (4,9%)	5,5 (5,3%)	-	0,3 (1,5%)	0,3 (0,8%)	-	-	-
Kame, terrasse de kame	-	-	-	-	1,4 (2,7%)	1,4 (1,3%)	-	-	-	-	-	-
Marin à faciès d'eau peu profonde	-	0,3 (1,2%)	0,3 (0,5%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Marin à faciès d'eau profonde	0,3 (12%)	0,6 (1,9%)	0,9 (1,6%)	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Moraine frontale	-	-	-	2,5 (4,8%)	-	2,5 (2,4%)	-	-	-	-	-	-
Till indifférencié	-	0,2 (0,6%)	0,2 (0,4%)	3,0 (5,7%)	0,5 (1,0%)	3,5 (3,4%)	0,4 (1,9%)	-	0,4 (1,1%)	2,2 (7,1%)	4,4 (14,1%)	6,6 (10,6%)
Till indifférencié mince	0,7 (2,4%)	1,3 (4,6%)	2,0 (3,5%)	8,8 (16,9%)	4,6 (8,9%)	13,4 (12,8%)	-	-	-	-	-	-
Urbain	-	-	-	4,5 (8,5%)	5,1 (9,9%)	9,6 (9,2%)	1,0 (5,5%)	0,5 (2,9%)	1,5 (4,1%)	-	-	-
Longueur totale du tronçon	28,5 (100%)	29,0 (100%)	-	52,2 (100%)	52,1 (100%)	-	18,3 (100%)	18,7 (100%)	-	31,1 (100%)	31,1 (100%)	-

Source : MFQ (1993).

**Tableau 3.2** Macrorestes identifiés dans les horizons organiques des paléosols des plaines alluviales.

			Station d'échantillonnage						
Espèce	Milieu*	Type de fragments	EAT-7	EAT-15	EAT-8	EAT-8a	RIC-20	SNI-1-O1	WIN-5
<b>Arbres / Arbustes</b>									
-	-	charbon de bois	3	-	-	-	-	-	-
Prunus pensylvanica	m.o.	demi-graine	1	2	-	-	-	-	-
Rubus type idaeus	pa	graine	-	-	-	-	2	10	-
Sambucus canadensis	m.o. + hu	graine	-	2	-	-	-	1	-
<b>Herbes</b>									
Aralia racemosa	m.o. + b.r.	graine	-	4	-	-	-	-	-
Carex (3 côtés)	m.o.	graine	-	1	-	-	-	3	-
Chenopodium	m.o.	graine	-	-	-	-	1	-	1
Oxalis stricta	m.o.	graine	1	-	-	-	-	-	-
Polygonum aviculare	m.o.	graine	1	-	-	-	-	-	-
Viola sp.	m.o.	graine	1	-	-	-	-	-	-
<b>Insectes</b>									
Carabidae	-	élytre	1	-	-	-	-	-	-
Formicidae	-	cocon	1	-	-	-	-	-	-
Insecte	-	larve	-	-	1	-	-	-	-
Lepidoptera	-	pupe	-	-	-	-	-	-	1
<b>Champignons</b>									
Cenococcum graniforme-sclerotia	-		54	28	-	1	-	-	-

\*m.o. : milieu ouvert

b.r. : bois riche

pa : pâturage

hu : humide

**Tableau 3.3** Analyses physico-chimiques des horizons de sols aux stations d'échantillonnage.

Secteur	Station	Profondeur (cm)	Texture	pH CaCl2	C.O. (%)	Al (%)	Fe (%)	Al+Fe (%)
SNI	AVE-9	40	LSTF	6,22	2,05	0,1	0,3	0,4
SNI	AVE-9	100	SLF	5,94	0,64	0,08	0,27	0,35
RIC-WIN	WIN-10	75	SLF	5,42	1,81	0,11	0,37	0,48
RIC-WIN	WIN-10	150	LL	5,45	2,64	0,12	0,33	0,45
RIC-WIN	SAU-11	25	SM	4,89	3,16	0,13	0,45	0,58
RIC-WIN	SAU-11	75	SM	4,88	2,1	0,09	0,34	0,43
RIC-WIN	BRO-18	25	LSTF	6,13	1,73	0,1	0,32	0,42
RIC-WIN	BRO-18	75	LSTF	5,89	1,6	0,11	0,37	0,48
RIC-WIN	STO-19	25	LSTF	4,71	1,48	0,19	0,56	0,75
RIC-WIN	STO-19	75	LSTF	4,88	1,16	0,12	0,42	0,54
RIC-WIN	WIN-5	25	LS	5,32	1,92	0,11	0,31	0,42
RIC-WIN	WIN-5	75	LS	5,8	1,39	0,08	0,27	0,35
MAS	MAS-13	25	L	4,67	1,59	0,14	0,53	0,67
MAS	MAS-13	85	SLF	4,61	1,17	0,16	0,3	0,46
MAS	LEN-17	25	LSTF	5,51	2,16	0,1	0,29	0,39
MAS	LEN-17	75	LSTF	5,39	0,86	0,1	0,34	0,44
EAT	EAT-8	25	LSF	5,35	1,32	0,11	0,37	0,48
EAT	EAT-8	75	SM	5,37	0,55	0,1	0,29	0,39
EAT	EAT-8a	10	L	5,83	1,57	0,06	0,2	0,26
EAT	EAT-8a	75	SLF	5,9	1,14	0,06	0,23	0,29
EAT	EAT-8a	85	SL	5,3	0,69	0,08	0,28	0,36
EAT	EAT-8a	95	SLTF	5,3	0,38	0,07	0,33	0,4
EAT	EAT-8a	100	LG1	5,78	0,45	0,07	0,27	0,34
EAT	EAT-16	25	SLF	6,31	0,92	0,06	0,19	0,25
EAT	EAT-16	75	SLF	6,02	0,65	0,05	0,16	0,21
Moyenne				5,44	1,55			0,45

1: Lit de graviers

**Tableau 3.4** Composition texturale des sédiments de surface aux stations d'observation.

Secteur	Station	Profondeur (cm)	Classe texturale	UTM	
SNI	SNIO-1	>80	Sable grossier	5080275	709526
SNI	SNIO-2	100	Sable grossier	5077302	710089
SNI	SNIO-3	60	Sable grossier	5079975	708386
SNI	SNIO-3	>60	Sable-argileux	5079975	708386
SNI	SNIO-4	100	Sable moyen à fin	5080015	708421
SNI	SNIO-5	75	Sable moyen à fin	5078856	712003
SNI	SNIO-6	>150	Limon sableux fin	5077833	710235
SNI	SNIO-7	30	Limon fin	5077104	710659
SNI	SNIO-7	>30	Gravier	5077104	710659
SNI	SNIO-8	150	Sable	5075419	711509
SNI	SNIO-8	>150	Gravier	5075419	711509
SNI	ULVO-9	80	Limon sableux fin	5068719	714959
SNI	ULVO-9	>80	Sable moyen	5068719	714959
RIC-WIN	RICO-10	50	Limon	5058748	722852
RIC-WIN	RICO-10	>50	Sable limoneux	5058748	722852
RIC-WIN	RICO-11	50	Limon	5058830	722796
RIC-WIN	RICO-11	>50	Sable limoneux	5058830	722796
RIC-WIN	RICO-12	100	Limon	5057651	724107
RIC-WIN	WINO-13	>75	Limon	5051640	732963
RIC-WIN	WINO-14	>80	Limon	5053234	731390
RIC-WIN	WINO-15	>80	Limon	5053788	729960
RIC-WIN	WINO-16	50	Limon	5053783	729920
RIC-WIN	WINO-16	>50	Sable fin	5053783	729920
RIC-WIN	WINO-17	>100	Limon argileux	5048377	734238
RIC-WIN	STOO-18	>50	Limon sableux fin	5042487	736954
RIC-WIN	STOO-19	50	Limon sableux fin	5043581	735770
RIC-WIN	STOO-20	>60	Limon sableux	5045275	735298
RIC-WIN	WINO-25	75	Limon	5056358	725728
MAS	MASO-21	>100	Limon	5021290	742035
MAS	MASO-22	>100	Limon très fin	5021332	742032
MAS	MASO-23	130	Limon	5024237	744216
MAS	MASO-23	>130	Sable	5024237	744216
MAS	MASO-24	>100	Limon	5025249	745099
MAS	MASO-26	100	Limon sableux	5028565	746635
MAS	MASO-26	>100	Gravier	5028565	746635
MAS	MASO-27	>100	Limon fin	5021619	431117

**Tableau 3.5** Datations radiocarbone, couches contaminées (C<sub>10</sub>-C<sub>50</sub>) et évaluation des taux de sédimentation des plaines alluviales.

Station	Epaisseur des sédiments (cm)	Type de matériel <sup>I</sup>	Âge <sup>14</sup> C	Âge calendrier 2 sigma	Âge calendrier médian	Taux de sédimentation moyen (cm a <sup>-1</sup> )	UTM	
SNI-1 (O1)	84	m.o.	moderne	-	-	-	5079351	708379
SNI-1 (O2)	124	m.o.	70±60	1802-1939 AD	1870	0,93	5079351	708379
SNI-2	123	m.o.	140±60	1792-1951 AD	1871	0,93	5079269	708384
SNI-3	90	m.o.	70±60	1802-1939 AD	1870	0,68	5079025	712280
RIC-20	155	m.o.	160±70	1650-1952 AD	1801	0,77	5061381	721673
WIN-5	135	m.o.	200±60	1631-1900 AD	1765	0,57	5053975	729071
EAT-7	141	m.o.	30±70	1802-1938 AD	1870	1,06	5029397	776703
EAT-8a	45	m.o.+c.b.	270±70	1391-1644 AD	1517	0,09	5029135	778510
EAT-8a	80	m.o.	440±80	1447-1694 AD	1570	0,18	5029135	778510
EAT-16	110	m.o.	60±60	1802-1938 AD	1870	0,83	5030352	771634
TRE-14	120	LL	-	-	1955 <sup>II</sup>	2,45	5068719	714959
WINO-13	174	L	-	-	1955	3,55	5051640	732963
STOO-19	205	LSTF	-	-	1955	4,18	5043581	735770
MAS-12	124	SLTF	-	-	1955	2,53	5019315	427746
MAS-13	90	SLF	-	-	1955	1,84	5022438	446023

I: m.o.: matière organique ; c.b.: charbon de bois. II : âge présumé de la contamination (cf . Saint-Laurent et St-Laurent, 2004).

**Tableau 3.6** Événements d'inondation recensés dans les secteurs SNI et EAT.

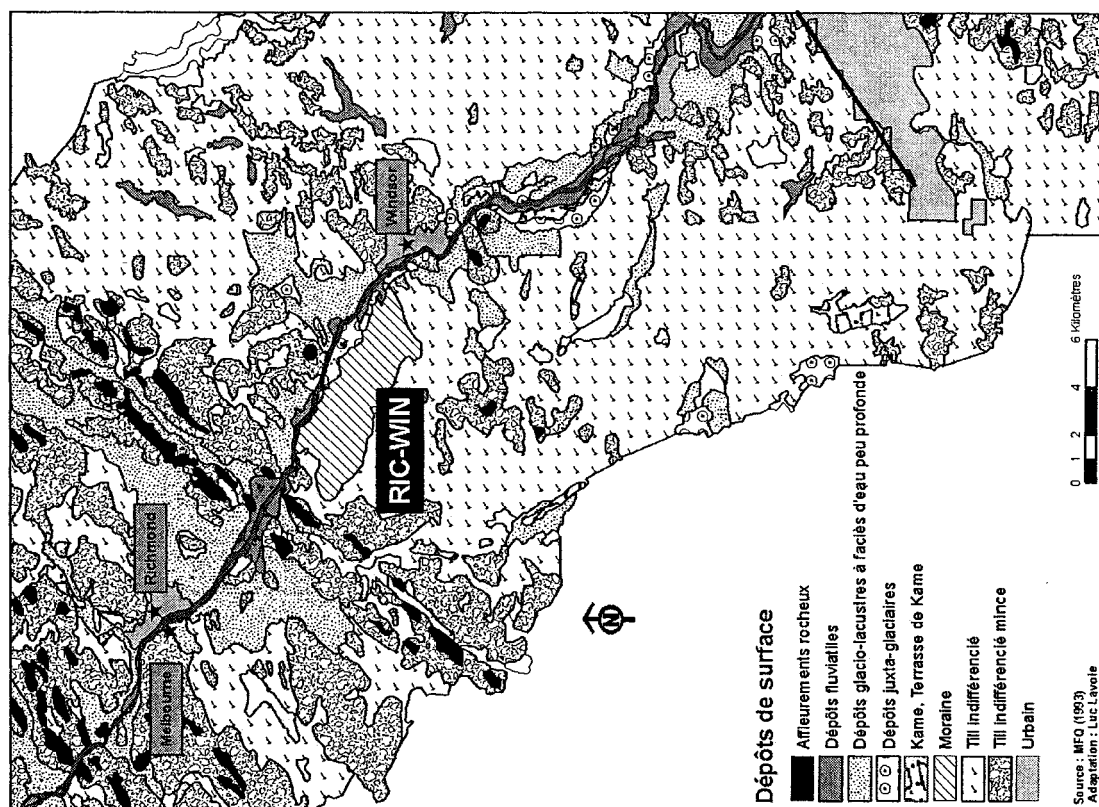
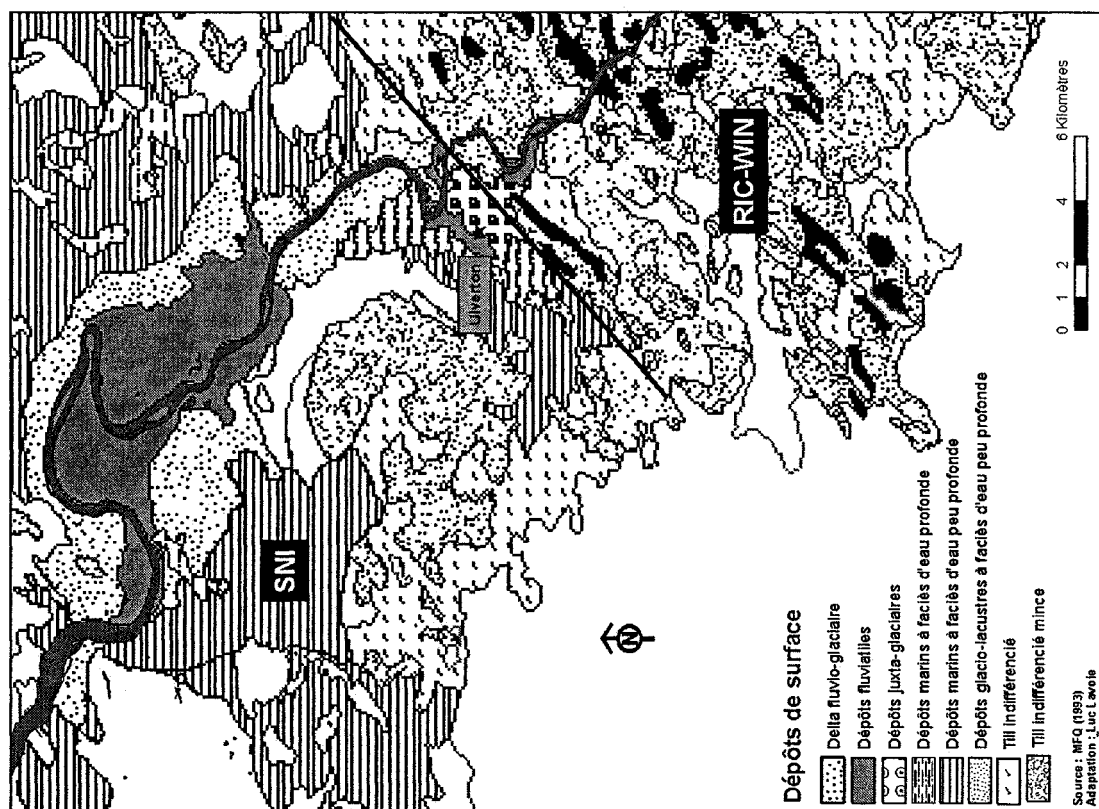
<b>Date des inondations</b>	
<i>Saint-Nicéphore</i>	<i>Eaton</i>
Mars-03	Oct-03
Jan-98	Nov-03
Mars-Avr-1998	Jan-99
Jan-96	Jan-98
Fev-96	Mars-Avr-1998
Jan-95	Jan-96
Avr-94	Août-96
Mars-92	Avr-94
Avr-92	Oct-90
Mars-89	Mars-90
Dec-83	Jan-86
Avr-82	Avr-82
Fev-81	Mars-Avr-1976
Mars-Avr-1976	Avr-74
Avr-74	Jan-73
Dec-73	Fev-73
Mai-72	Mars-73
Août-72	Juin-42
Mars-68	Avr-28
Avr-67	Mai-28
Dec-57	Oct-28
Juin-43	Nov-27
Juin-42	Sept-24
Avr-39	Fev-15
Avr-28	Avr-14
Nov-27	Mars-13
Mars-13	Mai-1876
Avr-11	
Avr-1883	

**Tableau 3.7** Évaluation du taux sédimentaire à partir de la fréquence des inondations.

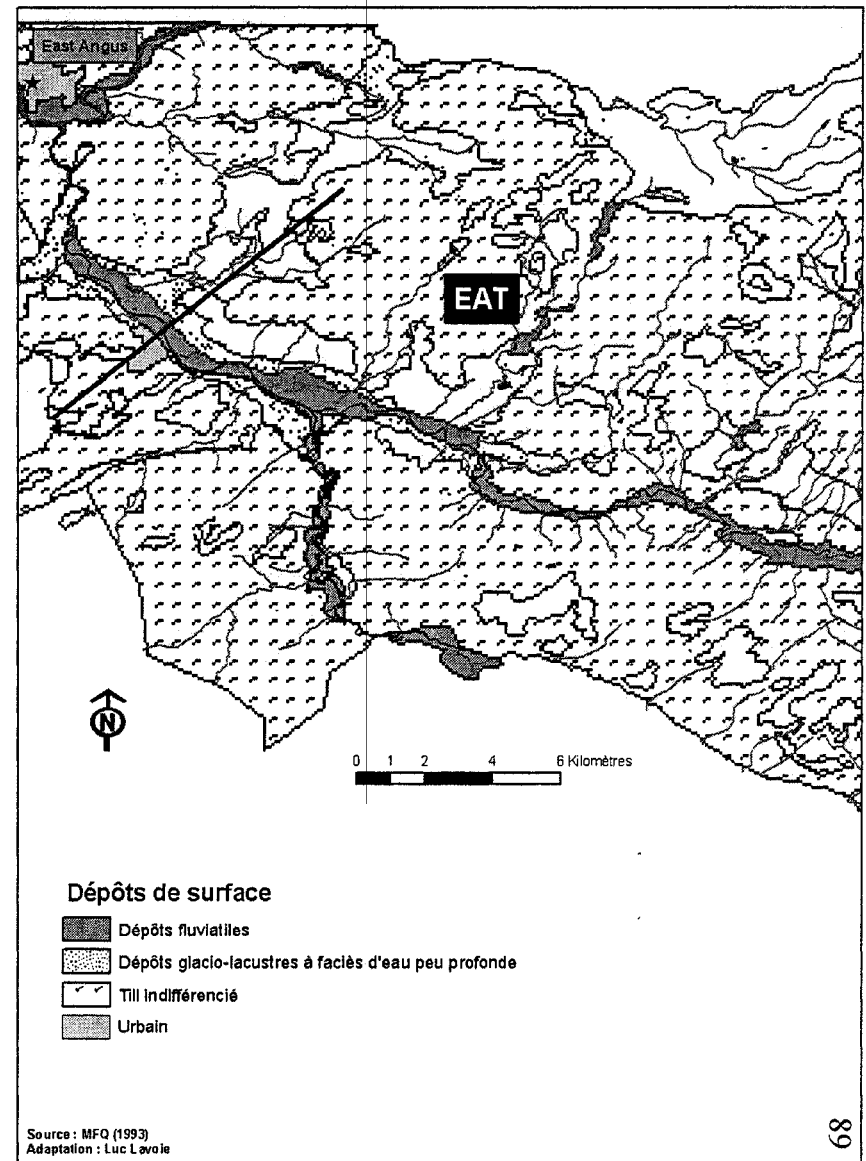
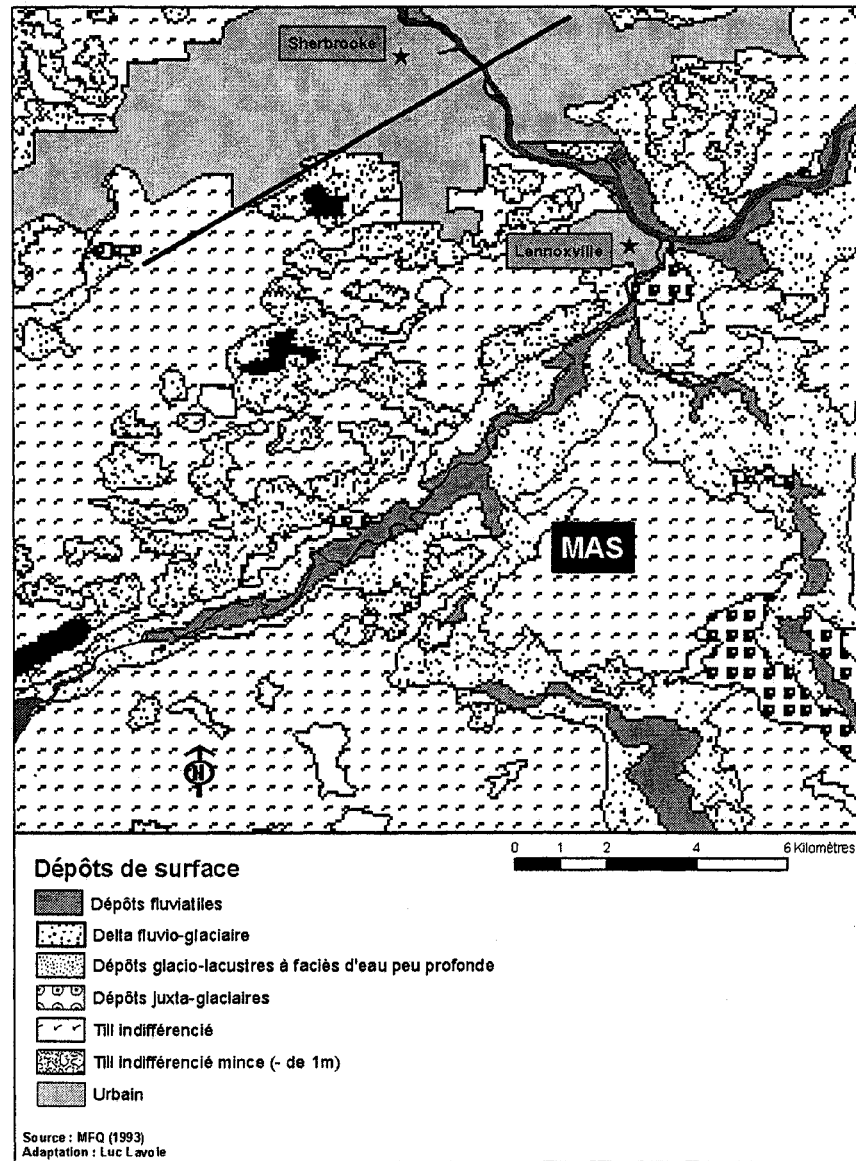
Bassin	Secteur	Station	Âge <sup>14</sup> C	Âge calendrier 2 sigma	Âge (cal.) médian	Nombre d'inondations (période recensée) 1864-2004	Epaisseur des sédiments (cm)	Taux de sédimentation
Rivière Saint-François	SNI	SNI-1 (O2)	70±60	1802-1939 AD	1870	29	124	4,28
Rivière Saint-François	SNI	SNI-2	140±60	1792-1951 AD	1871	29	123	4,24
Rivière Saint-François	SNI	SNI-3	70±60	1802-1939 AD	1870	27	90	3,33
Rivière Eaton	EAT	EAT-7	30±70	1802-1938 AD	1870	27	141	5,22
Rivière Eaton	EAT	EAT-16	60±60	1802-1938 AD	1870	27	110	4,07



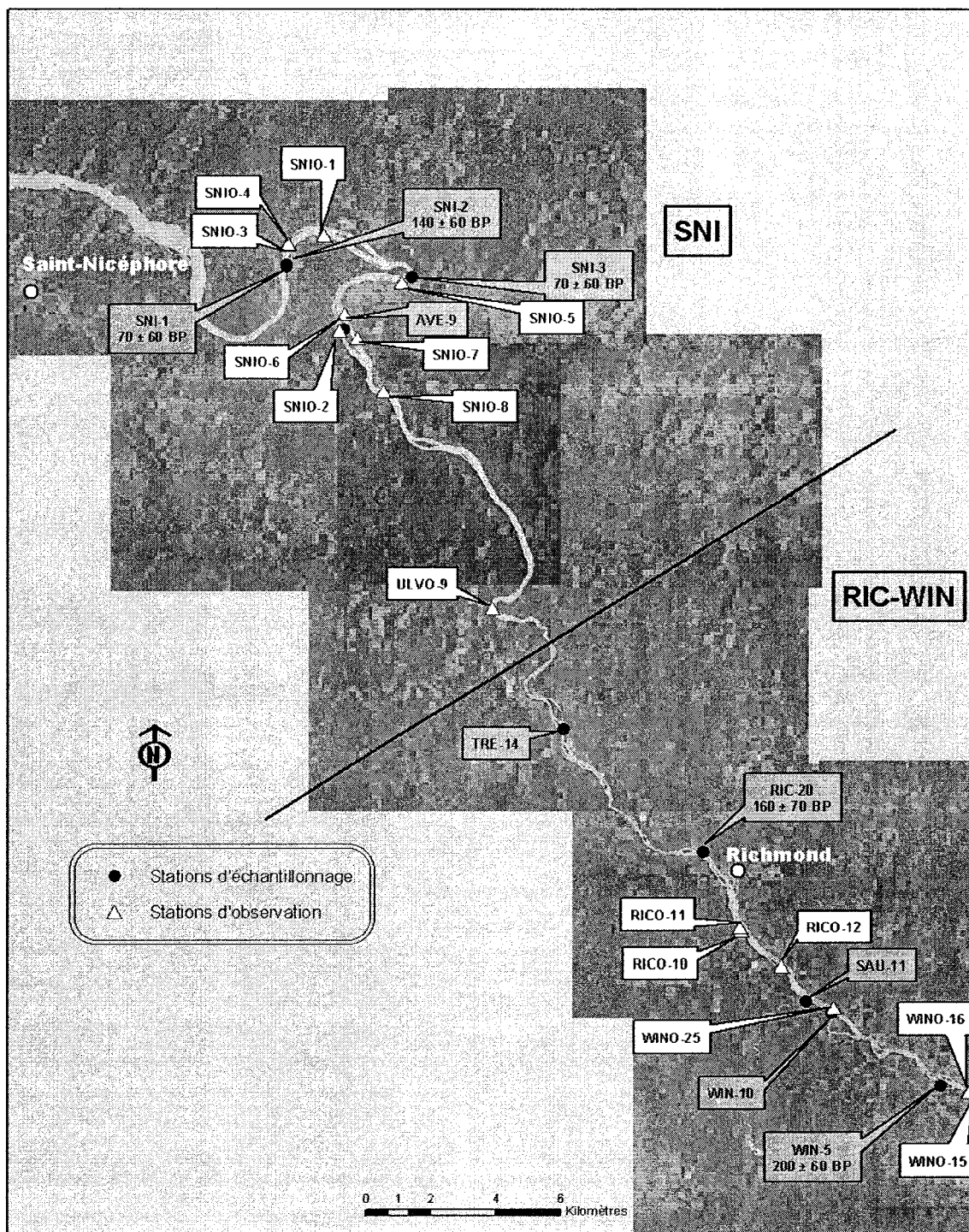
Figure 3.1 Carte des dépôts de surface des secteurs Saint-Nicéphore (SNI) et Richmond-Windsor (RIC-WIN).



**Figure 3.2** Carte des dépôts de surface des secteurs Massawippi (MAS) et Eaton (EAT).

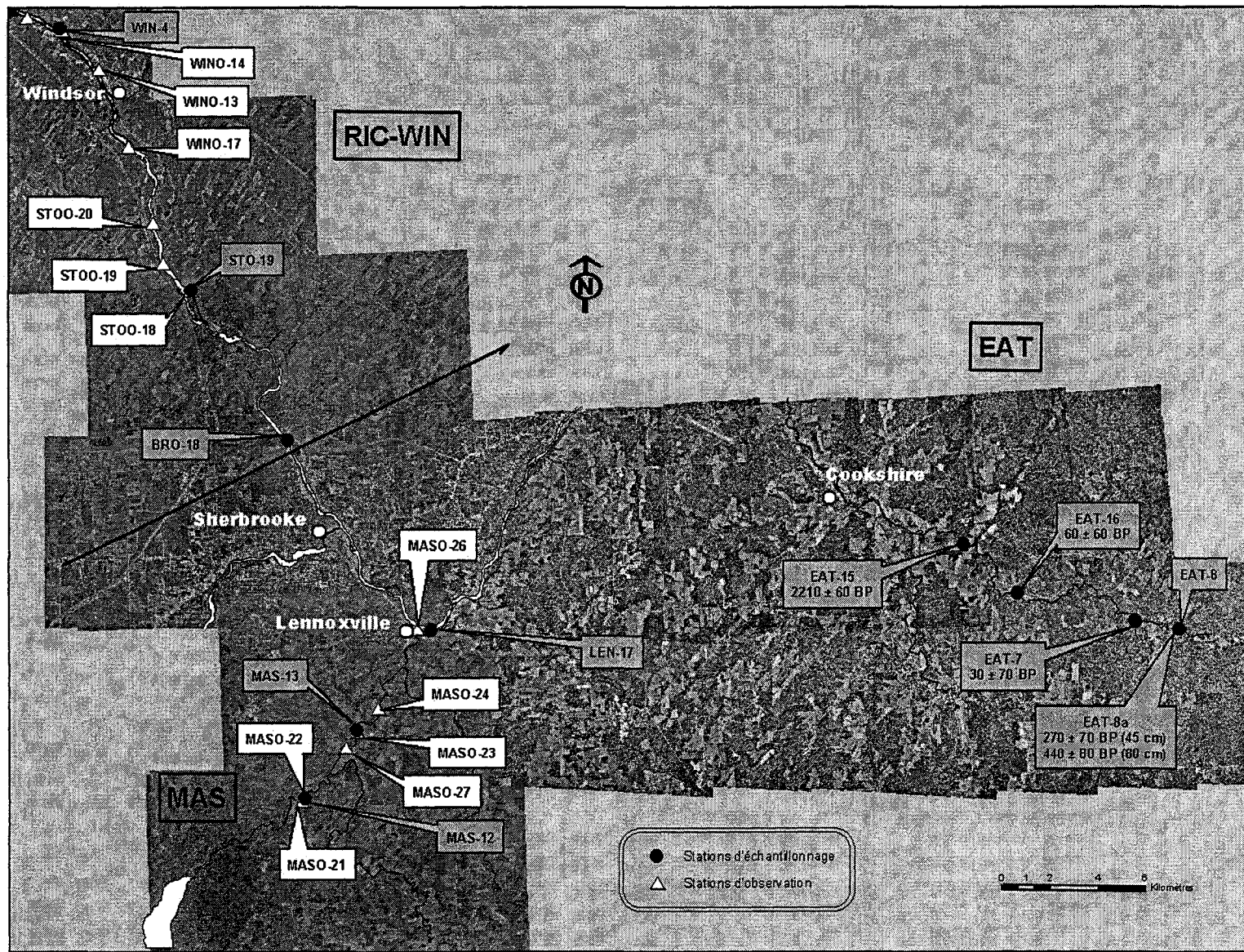


**Figure 3.3** Localisation des stations d'échantillonnage et d'observation dans les secteurs Saint-Nicéphore (SNI) et Richmond-Windsor (RIC-WIN).



Projection : UTM NAD 83 Zone 18  
Carte réalisée par Luc Lavoie

**Figure 3.4** Localisation des stations d'échantillonnage et d'observation dans les secteurs Massawippi (MAS) et Eaton (EAT).



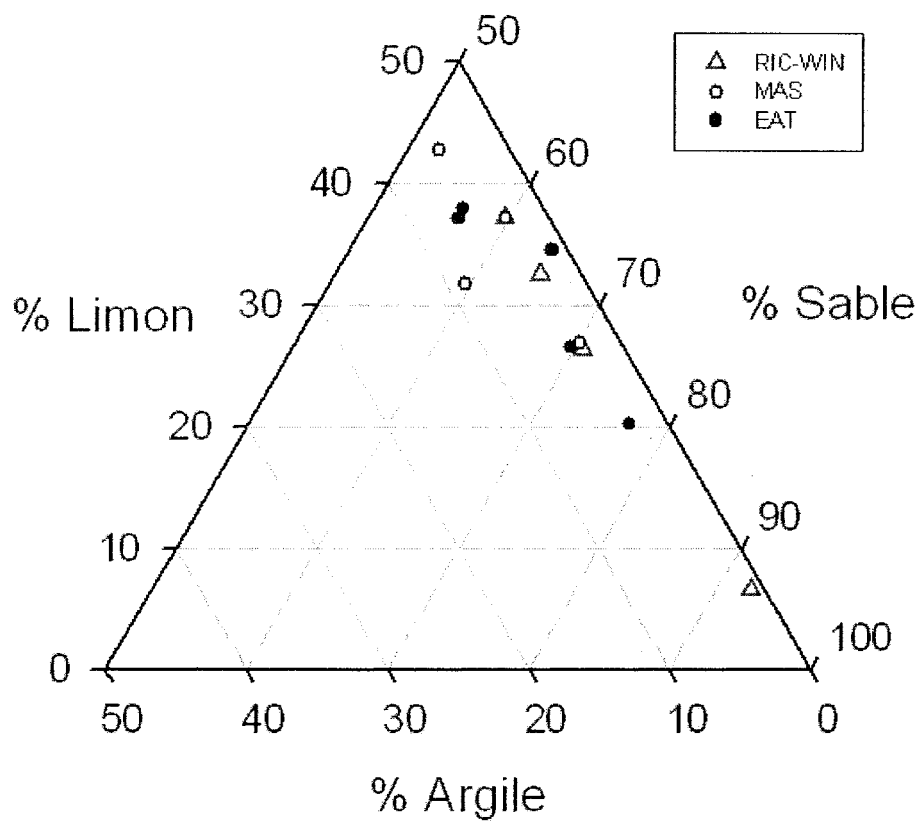
Projection : UTM NAD 83 Zone 18  
Carte réalisée par Luc Lavoie



**Figure 3.5** Représentation schématique des sols et paléosols des plaines alluviales des différents secteurs.

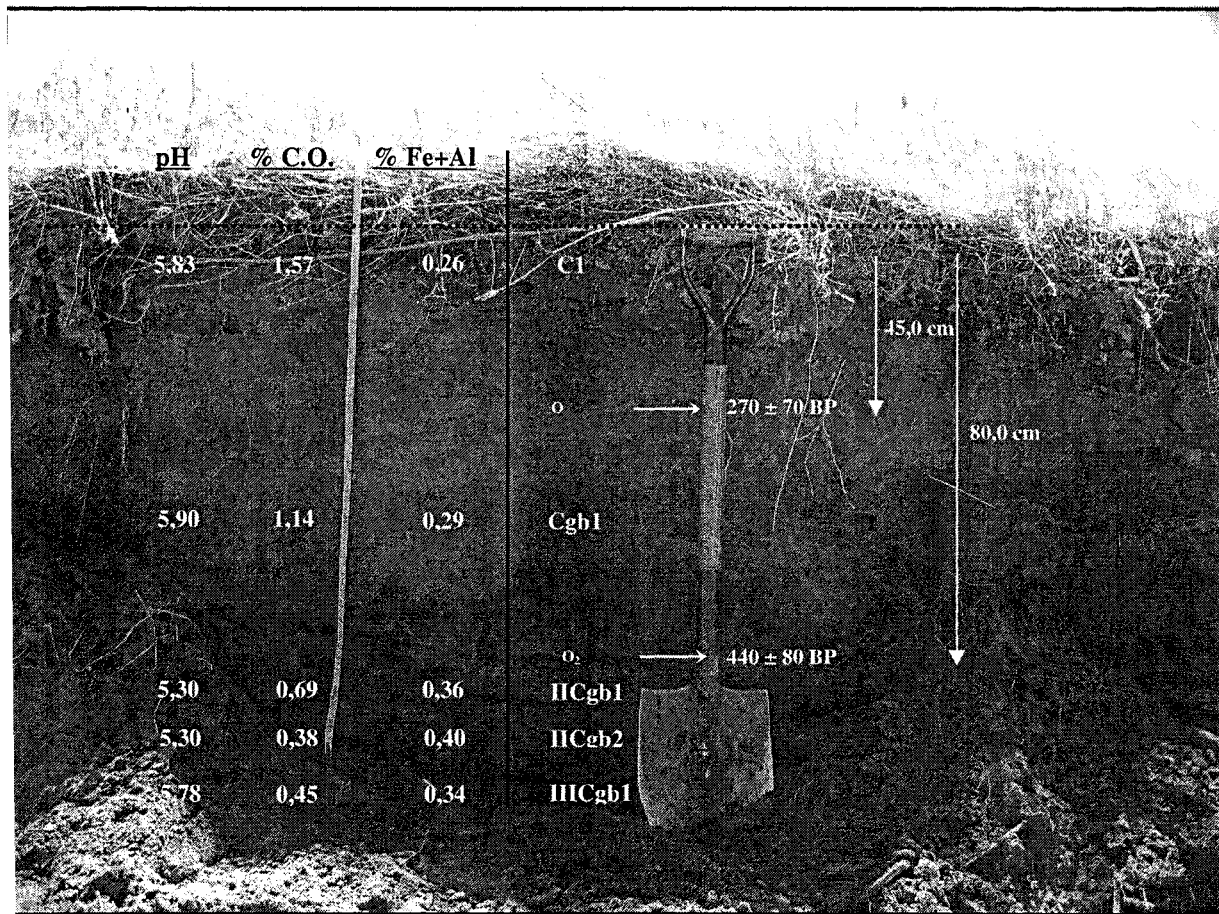


**Figure 3.6** Diagramme des classes texturales des profils de sol analysés dans les secteurs RIC-WIN, MAS et EAT.



**Figure 3.7** Exemple typique d'un profil de sol dans le secteur Eaton (station EAT-8a). La partie supérieure (0-80 cm) du profil est caractérisée par une matrice texturale fine et par un faible développement pédogénétique.





0 – 20,0 cm

C1

Limon; gris-brun foncé (10YR 4/2h); racines très nombreuses.

20,0 – 45,0 cm

C2

Sable limoneux fin; brun foncé (10YR 3/3h); racines nombreuses.

45,0 – 46,0 cm

O1

46,0 – 80,0 cm

Cgb1

Sable limoneux fin; brun foncé (10YR 3/3h ); racines nombreuses; marbrures peu

80,0 – 82,0 cm

O2

82,0 – 91,0 cm

II Cgb1

Sable limoneux; gris-brun (10YR 4/2,5h).

91,0 – 101,0 cm

II Cgb2

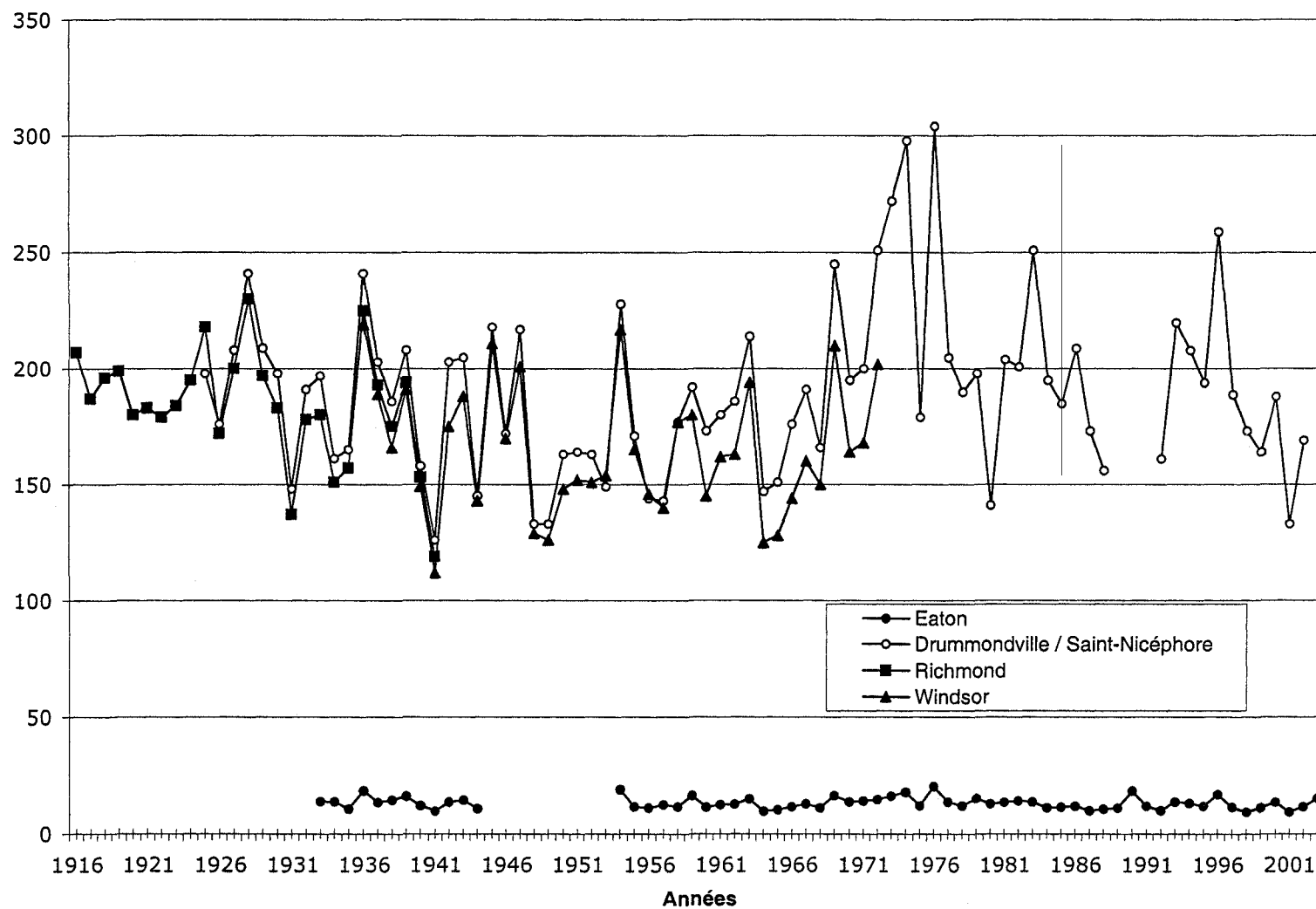
Sable limoneux très fin; gris-brun foncé (10YR 4/2h); marbrures peu nombreuses.

101,0 cm ++

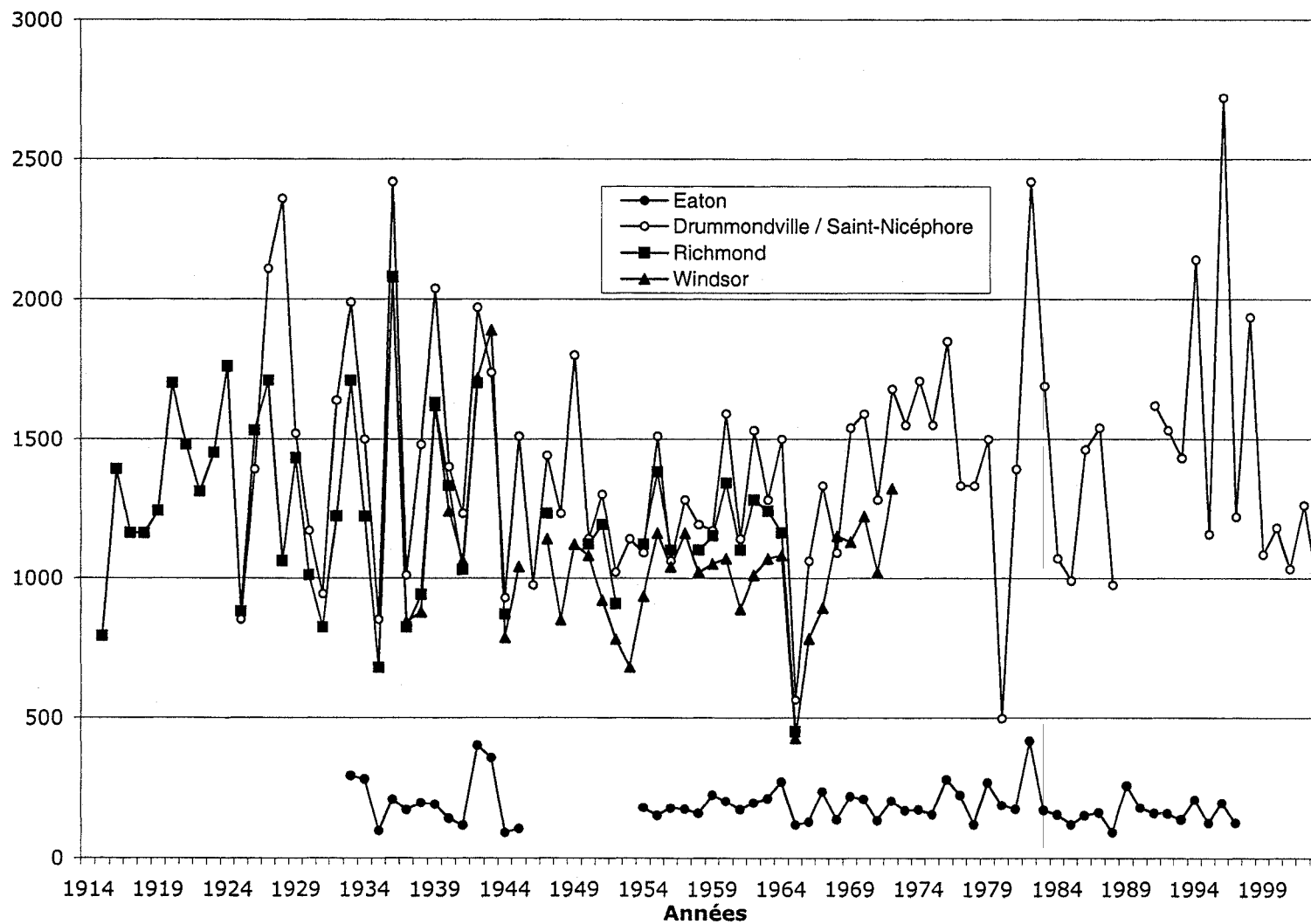
III Cgb1

Sable limoneux très fin; brun-jaune foncé (10YR 3/4h ).

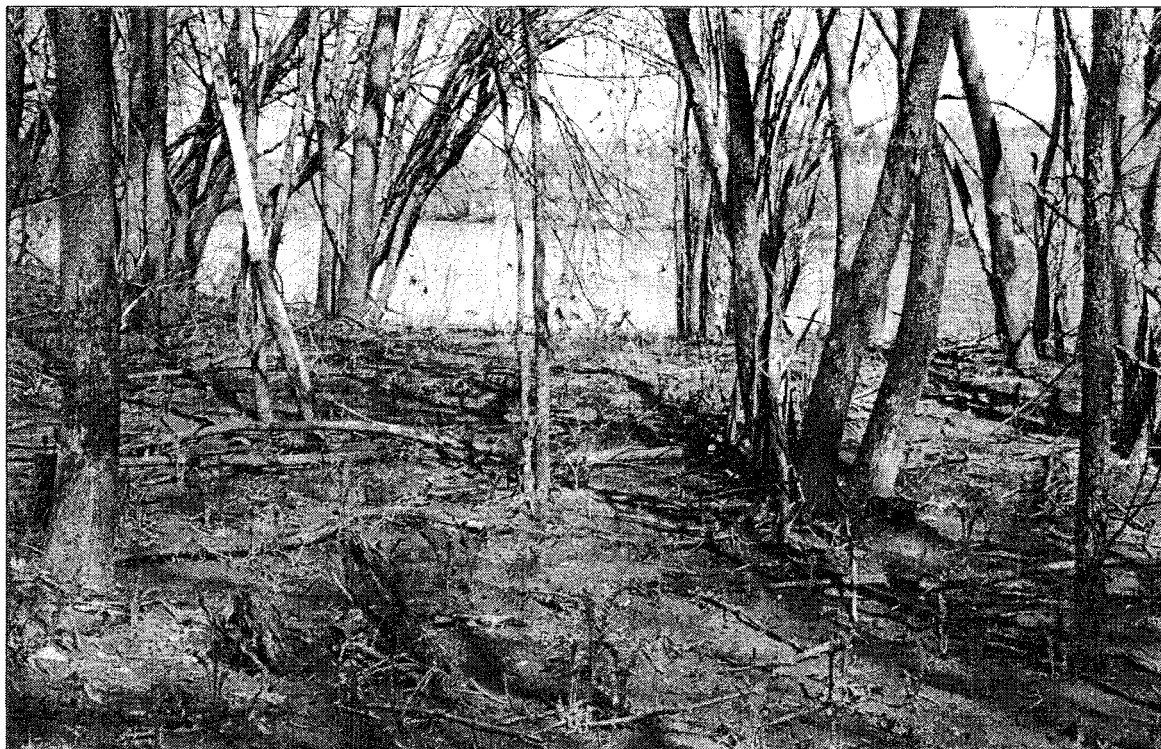
**Figure 3.8** Courbe des débits moyens annuels mesurés dans les différents secteurs d'étude.



**Figure 3.9** Courbe des débits maximums journaliers mesurés dans les différents secteurs d'étude.



**Figure 3.10** Limons de crues déposés sur le replat d'une plaine alluviale dans le secteur de Windsor au printemps 2003. L'accumulation mesurée est de l'ordre de 1,5 à 3,5 cm à cet emplacement.



**Figure 3.11** Photographie montrant les amas de feuilles et brindilles accrochés aux branches des arbres après une crue (printemps 2003). Le niveau atteint par les eaux de la rivière Massawippi dépassait plus de deux mètres du niveau moyen.



## ANNEXES

**Annexe A :** Revue de littérature, *Revue des Sciences de l'Eau*.

## Les différentes approches méthodologiques de reconstitution des paléo-inondations : une revue de la littérature

### Different methodological approaches in paleoflood reconstruction: a literature review

D. SAINT-LAURENT\*, L. LAVOIE

Reçu le 18 février 2003, accepté le 3 octobre 2003\*\*.

#### SUMMARY

The last two decades of scientific research have been characterized by an increase in the number of studies on global warming and its impact on the earth's various environments (e.g., terrestrial and aquatic ecosystems, river systems). The research concerns different fields such as geomorphology, ecology, hydrology and many others. In the context of climatic change, there is growing interest in the study of past floods or paleofloods. Researchers are attempting to reconstruct the chronology of past floods, especially with respect to past or subrecent (past centuries) climatic changes. The work involves using different methodological approaches borrowed from various disciplines including geology, geomorphology and ecology. The reconstruction of ancient hydrological events such as paleofloods in fact requires that different methods and techniques be combined in order to retrace the chronology of events as precisely as possible using different biological and physical indicators. The earliest research in this field was conducted in the United States, more specifically in the southern and southwestern parts of the country, which are regions characterized by an arid and semi-arid climate. Over the last few years, however, there have been an increasing number of studies from various parts of the world. Much of this research is based on previous work but with new elements of interpretation, which are mainly related to the many fluvial environments and climatic patterns associated with floods.

A wide variety of indicators are used in the chronological reconstruction of ancient fluvial environments, whether in humid, sub-humid or desert regions. These indicators involve analyzing stratigraphic sequences and sedimentary deposits, organic matter and macrofossil deposits, as well as using radiocarbon dating ( $^{14}\text{C}$ ), thermoluminescence (TL), and even dendrochronology. Some research uses statistical and mathematical models to evaluate river flow rates, which are transposed and adapted to ancient flood events. In

Université du Québec à Trois-Rivières, Géographie, C.P. 500, Trois-Rivières, Québec, G9A 5H7, téléphone : (819) 376-5011 (poste 3674), télécopieur : (819) 376-5179.

\* Correspondance : courriel : diane\_saint-laurent@uqtr.ca.

\*\* Les commentaires seront reçus jusqu'au 30 septembre 2004.

fact, most of the work pertaining to the reconstruction of the frequency and magnitude of ancient floods uses several methods and techniques to obtain the long-term chronology of flood events in relation to the specific conditions (e.g. climate, geomorphology) of a region or study area.

Many studies have analyzed slackwater deposits to reconstruct the paleo-flood history of rivers (ELY and BAKER, 1985 ; JONES *et al.*, 2001 ; KOCHER and BAKER, 1982 ; WOHL *et al.*, 1994). These kinds of deposits are mainly composed of fine-grained sediments (silt and fine sand) from river banks that were deposited during "large floods in areas of reduced flow velocity caused by ponding, eddying, or back-flooding up tributaries" (ELY and BAKER, 1985, p. 104). These deposits were found in different fluvial environments and for many researchers serve as adequate physical and geomorphologic indicators in the reconstruction of relic floods. Also, in many studies researchers used both slackwater deposits (SWD) and paleostage indicators (PSI) for the reconstruction of ancient floods. In addition to slackwater sediments, flood debris and silt lines (paleostage indicators) are often well-preserved along the river terraces (BAKER, 1987 ; OSTENAA *et al.*, 2002 ; WOHL *et al.*, 1994) and facilitate the reconstruction of ancient flood events.

The main problem in reconstructing paleofloods essentially lies in finding layers of organic matter in the sedimentary sequences, which makes it difficult to date the flood events using radiocarbon methods ( $^{14}\text{C}$ ). In arid or semi-arid environments, these organic layers are often rare because the prevalent climatic conditions do not favor the formation of a thick vegetation cover. However, this problem is not limited to these environments but also characterizes humid regions (YANG *et al.*, 2000). The frequent absence of such organic matter layers in sediments is either due to an overly short vegetation cover formation period between phases of flooding or the erosion of such layers through the action of different natural phenomena (e.g. streaming, gliding, bioturbation, fluvial erosion). Other methods through which flood events can be dated include dendrochronology and thermoluminescence (TL). This last method can be used to obtain relatively precise dating of archaeological artefacts but at present is not very reliable for dating mineralogical samples (e.g. quartz or feldspath grains). The various problems involved in dating ancient floods make us aware of the importance of using as many physical and biological field indicators as possible in order to reconstruct the chronology of flood events as precisely as possible.

**Key-words:** *paleohydrology, paleofloods, climatic change, multidisciplinary approach, literature review.*

## RÉSUMÉ

Les deux dernières décennies en recherche scientifique se caractérisent par la multiplication des travaux concernant le réchauffement planétaire et les conséquences appréhendées de ce phénomène dans les divers milieux du globe. Ces travaux de recherche touchent différents champs disciplinaires dont la géomorphologie, l'hydrologie, l'écologie et bien d'autres. Dans le contexte des changements climatiques, on voit apparaître un intérêt grandissant pour l'étude des inondations anciennes ou des paléo-inondations. On tente de reconstituer la chronologie des inondations du passé notamment en regard des changements climatiques anciens ou subactuels (derniers siècles). Devant l'émergence de nombreux travaux dans ce domaine de la paléohydrologie, il nous est apparu intéressant d'examiner à travers une revue de la littérature scientifique les différentes approches méthodologiques utilisées dans l'étude des paléo-inondations. On s'attarde à décrire les principales méthodes et techniques employées dans la reconstitution des anciennes inondations, en particulier pour les environnements fluviaux (rivières, fleuves). On passe en revue les différents indicateurs biophysiques utilisés, notamment



**l'analyse des séquences stratigraphiques et sédimentaires, l'analyse des macrorestes, les méthodes de datation radiocarbone ( $^{14}\text{C}$ ) et les techniques comme la thermoluminescence optique (TLO) et la dendrochronologie. Aussi, on présente les principaux modèles mathématiques utilisés dans la reconstitution des paléo-inondations, lesquels servent notamment à évaluer les variations niveaux/débits et la fréquence des inondations anciennes.**

**Mots clés :** *paléohydrologie, paléo-inondations, changement climatique, approche multidisciplinaire, revue de la littérature.*

## 1 - INTRODUCTION

Plusieurs recherches réalisées au cours des deux dernières décennies se sont intéressées aux impacts du réchauffement climatique sur la modification des différents écosystèmes et milieux (terrestres, aquatiques, fluviaux, etc.). La multiplication des travaux scientifiques dans ce domaine s'explique d'une part par la nécessité de mieux comprendre les phénomènes associés aux changements climatiques, lesquels touchent l'ensemble du système planétaire, et d'autre part, par le besoin de mettre en commun des bases de données exhaustives pouvant mener à l'application des modèles climatiques explicatifs à ces changements globaux. Il faut souligner, par ailleurs, les efforts consentis par plusieurs gouvernements et pays pour contribuer au financement et à la mise sur pied de réseaux nationaux et internationaux de chercheurs travaillant dans ce domaine.

Parmi les travaux scientifiques concernés par la problématique des changements climatiques, on compte un certain nombre de recherches qui touchent plus spécifiquement au domaine de l'hydrologie et de la paléohydrologie. Ces travaux cherchent notamment à établir des liens entre les changements climatiques et les variations des régimes fluviaux. Certaines recherches s'intéressent par exemple aux impacts du réchauffement planétaire sur le phénomène des inondations dans les dernières décennies et à la modification des systèmes hydrologiques en regard des changements climatiques (GALE *et al.*, 1990 ; KNOX, 1993 ; MORIN et SLIVITZSKY, 1992 ; NEWSON et LEWIN, 1991 ; PANAGOU-LIA-DIONYSIAL et DIMOU, 1997 ; RIND *et al.*, 1992 ; WELLS, 1990). Toutefois, il ressort que les échelles chronologiques utilisées sont souvent trop courtes pour évaluer correctement les impacts des changements climatiques sur les phénomènes hydrologiques (ALILA et MTIRAQUI, 2002 ; BROWN *et al.*, 2000 ; SMITH, 1992 ; STEDINGER et COHN, 1986). D'autre part, il devient difficile d'évaluer la part induite par les changements climatiques eux-mêmes et celle liée aux modifications anthropiques, en particulier depuis les derniers siècles et même davantage si l'on tient compte des modifications survenues (canalisation, dérivation, endiguement, déboisement des rives, etc.) sur plusieurs rivières et fleuves d'Europe par exemple, et qui remontent dans certains cas au-delà de plusieurs dizaines de siècles (MACKLIN et LEWIN, 2003 ; MORHANGE *et al.*, 1996 ; NEWSON et LEWIN, 1991 ; POESEN et HOOKE, 1997). Ces modifications anthropiques ont eu bien entendu une incidence importante sur le comportement hydrologique des cours d'eau affectés par ces activités

humaines. Outre ces facteurs anthropiques (déboisement, endiguement, etc.) qui modifient les conditions d'écoulement du bassin versant et des cours d'eau qui le composent, il faut également tenir compte des modifications liées à des processus naturels (sédimentation, érosion des rives, etc.) qui modifient progressivement les cours d'eau et leur régime hydrologique (GODARD, 1995).

Pour mieux évaluer justement les impacts des changements climatiques et leurs incidences sur les régimes fluviaux, plusieurs chercheurs ont tenté de reconstituer des échelles chronologiques beaucoup plus longues, soit l'échelle du millénaire (BAKER *et al.*, 1993 ; BROWN *et al.*, 2000 ; ELY *et al.*, 1993 ; ENZEL, 1992 ; GREENBAUM *et al.*, 2000 ; GROSSMAN, 2001 ; KNOX, 1985 ; MACKLIN *et al.*, 2003 ; SMITH, 1992). Ainsi, depuis quelques années, on voit apparaître un intérêt grandissant pour les études paléohydrologiques, notamment dans le domaine de la reconstitution des inondations anciennes ou des paléo-inondations (SAINT-LAURENT, 2003). Ces travaux cherchent en effet à mieux comprendre le contexte climatique et géomorphologique dans lesquels ces événements s'insèrent et ainsi à mieux comprendre l'incidence de tels événements en regard des changements des conditions climatiques actuelles et anciennes.

Devant la multiplication de ces travaux concernant l'étude des paléo-inondations, il nous est apparu intéressant d'examiner cette littérature scientifique, notamment en regard des approches méthodologiques utilisées pour reconstruire la chronologie de ces événements hydrologiques du passé. Par ailleurs, ces travaux ouvrent une perspective nouvelle aux études hydrologiques, mettant de l'avant des approches pluridisciplinaires qui permettent de comprendre les phénomènes dans leur globalité et sur une échelle plus longue.

## 2 – LES ÉTUDES PORTANT SUR LES PALÉO-INONDATIONS

Les études consacrées à la paléohydrologie et plus spécifiquement aux paléo-inondations sont relativement récentes, soit une vingtaine d'années (STARKEL, 1996). Il faut dire, toutefois, que les toutes premières études intéressées à comprendre le contexte des environnements fluviaux reliques remontent au début du 19<sup>e</sup> siècle avec les travaux du naturaliste suisse L. AGASSIZ (1838), lesquels travaux auraient eu une importante influence sur les travaux américains de l'époque, dont ceux de J.D. DANA (1882) dans les Appalaches (É.-U.), et plus tard, ceux de J.H. BRETZ (1923) dans la région de la rivière Columbia (Washington) (voir COSTA, 1987, p. 49 ; PATTON, 1987). Les chercheurs tentaient de comprendre la mise en place des séquences stratigraphiques dont certaines étaient associées à des événements d'inondations majeures. Si ces travaux ont ouvert des perspectives nouvelles dans la recherche paléohydrologique, il faut dire cependant que les efforts soutenus de recherche dans l'étude des inondations anciennes sont très récents et couvrent essentiellement les deux dernières décennies. À cet égard, il faut mentionner les travaux pionniers de KOCHER et BAKER (1982) et de KNOX (1985) pour leur contribution au développement des méthodes d'analyse des paléo-inondations, notamment pour

l'identification de paramètres sédimentologiques permettant de caractériser les dépôts associés aux inondations anciennes.

Bien que le nombre de travaux américains domine dans ce domaine de la paléohydrologie, on constate que les dernières années sont marquées par la multiplication de travaux provenant de différentes régions du monde, notamment d'Australie, d'Afrique et d'Europe (AGASSE, 2003 ; ARNAUD-FASSETTA, 2002 ; BENITO *et al.*, 1998, 2003 ; BRUNETON *et al.*, 2002 ; HEINE et HEINE, 2002 ; HOUSE *et al.*, 2002a et 2002b ; JOHNSON et WARBURTON, 2002 ; JONES *et al.*, 2001 ; MACKLIN *et al.*, 1992 ; PICKUP *et al.*, 1988 ; WERRITTY *et al.*, 2003 ; YANG *et al.*, 2000 ; ZAWADA et HATTINGH, 1994). Ces travaux de recherche s'intéressent notamment à l'analyse des paléo-inondations en regard des changements climatiques des derniers millénaires (~10 000 ans), ou encore à l'analyse chronologique des inondations en utilisant différents indicateurs géomorphologiques et biologiques. Dans bien des cas, ces recherches s'appuient sur des approches menant à l'utilisation de méthodes et techniques variées, lesquelles sont généralement associées aux études paléoenvironnementales (paléoécologie, paléoclimatologie, paléosols, stratigraphie, etc.). Ceci permet de combiner différents indicateurs biophysiques qui fournissent un cadre d'analyse nécessaire pour reconstituer des événements hydrologiques anciens dans des environnements changeants.

### 3 – DIVERSITÉ DES ENVIRONNEMENTS FLUVIAUX

La majorité des travaux consacrés à l'étude des paléo-inondations a été réalisée dans des environnements caractérisés par des régimes fluviaux de climats arides ou semi-arides, telles que les régions du Sud ou du Sud-Ouest américain (BAKER, 2000 ; CHATTERS et HOOVER, 1994 ; ELY, 1997 ; EKY *et al.*, 1993 ; ENZEL *et al.*, 1993 ; GRIMM *et al.*, 1995 ; HOUSE et BAKER, 2001 ; HOUSE *et al.*, 2002b ; MCQUEEN *et al.*, 1993 ; O'CONNOR *et al.*, 1994 ; PARTRIDGE et BAKER, 1985 ; WEBB et RATHBURN, 1989 ; WEBB *et al.*, 2002), de l'Australie ou d'Afrique (BAKER *et al.*, 1985 ; GALE *et al.*, 1990 ; HEINE et HEINE, 2002 ; OSTENNA *et al.*, 2002 ; PICKUP *et al.*, 1988 ; WOHL *et al.*, 1994 ; ZAWADA et HATTINGH, 1994). Mais on trouve aussi un certain nombre de travaux réalisés dans des régions soumises à des conditions climatiques humides ou sub-humides, comme au Japon, en Inde ou en Chine (ELY *et al.*, 1996 ; GROSSMAN, 2001 ; JONES *et al.*, 2001 ; KALE *et al.*, 1997 ; THORSON, 1989 ; YANG *et al.*, 2000). Il existe aussi des travaux réalisés en régions tempérées ou froides, comme en Europe et au Canada (ARNAUD-FASSETTA, 2002 ; BENITO *et al.*, 1998 ; DUBAND, 2003 ; LIVINGSTON *et al.*, 2001 ; MACKLIN *et al.*, 1992 ; NEWSON et LEWIN, 1991 ; PASSMORE et MACKLIN, 1994 ; POESEN et HOOKE, 1997 ; SAINT-LAURENT et LAVOIE, 2003 ; SAINT-LAURENT et SAUCET, 2003 ; SAINT-LAURENT *et al.*, 2001 ; WOLFE et EDWARDS, 2001). Pour la plupart de ces travaux, les chercheurs s'intéressent à établir des chronologies des événements d'inondation qui s'étendent sur plusieurs siècles ou plusieurs millénaires (période Holocène). On compte également un certain nombre de travaux qui tentent d'établir des chronologies beaucoup plus longues, soit celles associées aux époques glaciaires

du Pléistocène par exemple (BAKER *et al.*, 1993 ; GORDON, 1993 ; SMITH et FISHER, 1993 ; THORSON, 1989). Dans ces derniers cas, on peut comprendre que la reconstitution d'inondations anciennes devient encore plus ardue, en raison des conditions physiques et climatiques exceptionnelles qui marquent cette période géologique et qui constituent désormais des environnements reliques. Enfin, un certain nombre de travaux a été réalisé dans des régions alpines ou montagneuses (GOTTESFELD, 1996 ; JARRETT, 1990 ; JARRETT et TOMLINSON, 2000 ; JOHNSON et Warburton, 2002 ; WAYTHOMAS et JARRET, 1994). Dans ces milieux, les cours d'eau sont souvent caractérisés par un régime de type « torrentiel » qui, en raison de la force des courants, permet le transport de sédiments grossiers de la taille des graviers, des cailloux ou même des blocs. La présence de ces matériaux et leur emplacement topographique a permis entre autres d'identifier diverses périodes d'inondation, actuelles ou subactuelles, soit entre les derniers millénaires de l'Holocène et les siècles derniers<sup>1</sup>.

Dans la reconstitution chronologique des inondations anciennes, les difficultés sont nombreuses. Il suffit de penser à la disparition de certains indicateurs biophysiques permettant justement de retracer par des évidences géomorphologiques ou biologiques des événements hydrologiques reliques. Ou encore, d'établir la variabilité des conditions climatiques à l'échelle locale ou régionale qui sont elles-mêmes sujettes à des changements constants. En somme, plusieurs difficultés se posent aux chercheurs qui tentent de reconstituer des événements du passé qui s'inscrivent souvent dans des environnements changeants, d'où la nécessité de faire appel à différentes méthodes et techniques empruntées à plusieurs disciplines.

#### 4 – LES DIFFÉRENTES APPROCHES MÉTHODOLOGIQUES DANS L'ÉTUDE DES PALÉO-INONDATIONS

On peut identifier dans la littérature scientifique deux approches méthodologiques relativement distinctes concernant la reconstitution des paléo-inondations, soit l'une axée davantage sur les méthodes et modèles mathématiques largement utilisés en hydrologie, et l'autre qui fait appel à une approche pluridisciplinaire mettant à profit des méthodes et des techniques utilisées dans des disciplines des sciences de la Terre et de la biologie (écologie). Dans certains travaux, les chercheurs ont combiné ces deux approches afin de dresser le plus précisément possible les événements d'inondation sur une longue période chronologique et ce, en regroupant des données actuelles ou historiques (données hydroclimatiques, monographies régionales, journaux, etc.) et des données paléoenvironnementales (séquences stratigraphiques, paléosols, macrorestes, méthodes de datation, etc.). Pour mieux examiner ces différentes

1. La limite de la période « subactuelle » est très variable selon les auteurs, mais on la situe généralement dans les trois ou cinq derniers siècles (ex. RICARD et BÉGIN, 1999). Enfin, RAAP et HILL (1998, p. 224) fournissent une échelle chronologique très précise de la période Holocène avec une correspondance historique pour les travaux en archéologie.

approches, nous présentons un résumé synthèse des méthodes utilisées dans les études en paléo-inondations. Le tableau 1 donne un aperçu des études réalisées au cours des vingt dernières années en faisant référence aux méthodologies utilisées.

**Tableau 1** Études récentes concernant la reconstitution des paléo-inondations et les méthodes utilisées.

**Table 1** Recent studies concerning the reconstruction of paleofloods and methods used.

Auteurs	Année	Localisation géographique	Méthodes appliquées*				
			E	S	P	D	M
Alila et Mtraoui	2002	Rivière Gila	États-Unis (Arizona)				X
Arnaud-Fassetta	2002	Delta du Rhône	France	X	X	X	
Heine et Heine	2002	Rivière Kuiseb	Afrique		X	X	
House <i>et al.</i>	2002b	Rivière Verde	États-Unis (Arizona)		X	X	
Johnson et Warburton	2002	Rivière Raise Beck	États-Unis	X	X	X	X
Ostenaar <i>et al.</i>	2002	Rivière Big Lost	États-Unis		X	X	X
Webb <i>et al.</i>	2002	Rivière Paria	États-Unis		X	X	X
Yanosky et Jarrett	2002	Ruisseau Buffalo	États-Unis (Colorado)	X			
Greenbaum <i>et al.</i>	2001	Bassin Arava	Israël		X	X	X
Grossman	2001	Rivière Ara	Japon		X	X	
House et Baker	2001	Rivière Williams	États-Unis (Arizona)		X	X	X
Jones <i>et al.</i>	2001	Rivière Nakagawa	Japon		X	X	
Brown <i>et al.</i>	2000	Lac Ritterbush	États-Unis (Vermont)		X	X	X
Greenbaum <i>et al.</i>	2000	Bassin Nahal Zin	Israël		X	X	X
Jarrett et Tomlinson	2000	Rivière Yampa	États-Unis (Colorado)	X		X	X
Klawon <i>et al.</i>	2000	Rivière Platte	États-Unis		X	X	
Knox	2000	Vallée du Mississippi	États-Unis				X
St. George et Nielsen	2000	Rivière Rouge	Canada			X	X
Yang <i>et al.</i>	2000	Rivière Jaune	Chine		X	X	X
Manville <i>et al.</i>	1999	Lac Taupo	Nouvelle-Zélande		X	X	X
Astrade et Bégin	1997	Rivière Saône	France	X			
Ely	1997	Rivières de l'Arizona et de l'Utah	États-Unis		X	X	
Kale <i>et al.</i>	1997	Rivière Narmada	Inde centrale		X	X	
Ely <i>et al.</i>	1996	Rivière Narmada	Inde centrale	X	X	X	X
Gottesfeld	1996	Rivière Skeena	Canada (C.B.)	X			X
Grimm <i>et al.</i>	1995	Ruisseau Bear	États-Unis (Colorado)	X	X	X	X
Stevens	1994	Rivière Black Bear	États-Unis (Oklahoma)			X	X
Waythomas et Jarrett	1994	Rivière Arthurs Rock	États-Unis (Colorado)		X	X	
Wohl <i>et al.</i>	1994	Rivières Fitzroy et Margaret	Australie		X	X	X
Zawada et Hattingh	1994	Plusieurs rivières d'Afrique du Sud	Afrique		X	X	
Baker <i>et al.</i>	1993	Rivière Ob	Sibérie				X
Ely <i>et al.</i>	1993	Rivières de l'Arizona et de l'Utah	États-Unis		X	X	

(Suite)

Auteurs	Année	Localisation géographique	Méthodes appliquées*				
			E	S	P	D	M
Enzel <i>et al.</i>	1993	Rivière Colorado	États-Unis				X
Knox	1993	Vallée du Mississippi	États-Unis	X		X	
McQueen <i>et al.</i>	1993	Rivière Black Bear	États-Unis (Oklahoma)	X		X	X
Smith et Fisher	1993	Rivière Clearwater	Canada	X		X	X
Enzel	1992	Rivière Mojave	États-Unis (Californie)			X	X
Macklin <i>et al.</i>	1992	Ruisseau Thinhope	Angleterre	X	X	X	
Smith	1992	Rivière Orange	Afrique		X	X	
Jarrett	1990	Rivière Big Thompson	États-Unis (Colorado)	X	X	X	X
Wells	1990	Littoral Péruvien	Pérou		X	X	
Thorson	1989	Rivière Porcupine	États-Unis (Alaska)		X	X	
Pickup <i>et al.</i>	1988	Rivière Fink	Australie		X	X	
Chatters et Hoover	1986	Rivière Columbia	États-Unis (Washington)	X		X	X
Baker <i>et al.</i>	1985	Gorge Katherine	Australie		X	X	X
Ely et Baker	1985	Rivière Verde	États-Unis (Arizona)	X		X	X
Knox	1985	Vallée du Mississippi	États-Unis				X
Partridge et Baker	1985	Rivière Salt	États-Unis (Arizona)	X		X	X
Kochel et Baker	1982	Rivières Pecos et Devils	États-Unis (Texas)	X		X	X

\*E : Paléoécologie ; S : Sédimentologie et stratigraphie ; P : Paléosol ; D : Datation ( $^{14}\text{C}$ , thermoluminescence) ; M : Modèles mathématiques.

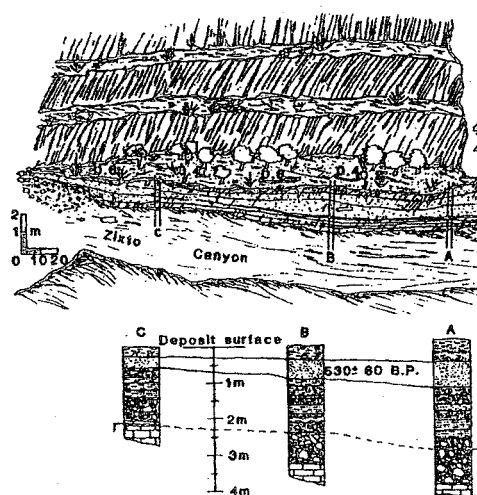
#### 4.1 Les méthodes de caractérisation (stratigraphie, sédimentologie, paléoécologie, pédologie)

##### 4.1.1 Stratigraphie et sédimentologie

L'analyse des séquences stratigraphiques et sédimentaires fournit des indicateurs largement utilisés pour reconstituer les différentes périodes d'inondation (ELY et BAKER, 1985 ; ELY *et al.*, 1996 ; ENZEL *et al.*, 1993 ; GREENBAUM *et al.*, 2001 ; HOUSE *et al.*, 2002b ; JONES *et al.*, 2001 ; KITE *et al.*, 2002 ; KRAWON *et al.*, 2000 ; KNOX et DANIELS, 2002 ; KOCHER et BAKER, 1988 ; MANVILLE *et al.*, 1999 ; O'CONNOR *et al.*, 1986). Les variations granulométriques des dépôts, la consistance et la coloration des couches, la présence de lits organiques, les altérations pédogénétiques, sont tous des paramètres qui permettent dans un premier temps d'identifier des dépôts d'inondation, et dans un second temps de les caractériser (contexte, évolution, magnitude, etc.). La chronologie précise des événements d'inondation doit par ailleurs s'appuyer sur la datation des matières organiques (débris ou couches organiques, etc.) trouvées dans les séquences sédimentaires, en utilisant des méthodes de datation au radio-carbone, ou encore en s'appuyant sur d'autres techniques de datation (voir section 4.2).

Dans les séquences stratigraphiques, il faut mentionner l'importance de l'analyse des dépôts « d'inondation », qualifiés de « *slackwater deposits* »

(SWD) en anglais, et qui constituent l'un des indices sédimentologiques les plus couramment utilisés pour établir la chronologie des inondations dans une région donnée (BAKER, 1987 ; BAKER *et al.*, 1988 ; BROWN *et al.*, 2000 ; COSTA, 1978 ; ELY et BAKER, 1985 ; GREENBAUM *et al.*, 2000, 2001 ; HOUSE *et al.*, 2002b ; JONES *et al.*, 2001). Ces dépôts sont constitués généralement de sédiments fins (limon, sable fin) qui servent en quelque sorte d'indicateurs pour retracer des inondations anciennes (voir figure 1). Ces dépôts occupent habituellement les niveaux supérieurs de la rive, marquant ainsi les limites atteintes par les inondations, et ils sont très souvent localisés à l'embouchure des rivières, là où les courants diminuent, permettant ainsi la sédimentation. La présence de ces dépôts est souvent combinée à d'autres indices de terrain, tels que les traces des niveaux d'eau laissées sur les parois rocheuses par exemple, ou les fragments grossiers de débris organiques (amas de feuilles, écorces, etc.) transportés lors d'inondations (ces indices additionnels sont qualifiés en anglais de *paleostage indicators* ou PSI) (BAKER, 1987 ; JARRETT et ENGLAND, 2002 ; KITE *et al.*, 2002 ; WEBB *et al.*, 2002). La superposition des couches sédimentaires permet donc de retracer les différentes phases d'inondation. On peut citer les travaux de KOCHER et BAKER (1982, 1988) et d'autres chercheurs qui ont couramment utilisés ces paramètres sédimentologiques pour l'étude des paléo-inondations, notamment dans le sud-ouest américain et d'autres régions chaudes (ELY et BAKER, 1985 ; ENZEL, 1992 ; GREENBAUM *et al.*, 2000, 2001 ; OSTENAA *et al.*, 2002 ; WOHL *et al.*, 1994 ; YANG *et al.*, 2000). KNOX (2000) rappelle à cet effet que les dépôts d'inondation (SWD) constituent une sorte de « donnée d'archive » pour reconstituer les anciennes inondations.



**Figure 1** Illustration schématique de sédiments d'inondation (SWD) situés au Canyon Zixto (Texas). Source : KOCHER et BAKER (1982) modifié par les auteurs.

*Schematic drawing of the slackwater deposits (SWD) localised at Zixto Canyon (Texas). Source: KOCHER and BAKER (1982) modified by the authors.*

Dans les régions arides ou semi-arides, on comprend que la présence de tels dépôts devient un indice sédimentologique relativement précis pour reconstituer la chronologie des inondations, puisque ces événements n'interfèrent nullement avec les crues printanières associées aux rivières soumises à un régime pluvio-nival par exemple. Ceci est un paramètre important à considérer lors de la reconstitution des périodes d'inondation. En effet, l'absence de crues annuelles (ou crues printanières) facilite grandement le travail d'interprétation sur le terrain et ce, en permettant d'identifier plus facilement les sédiments transportés lors des inondations. Dans le cas des rivières soumises à des crues annuelles, on comprend qu'il devient plus difficile d'identifier, le long des terrasses fluviales, les sédiments laissés par les crues printanières ou par le débordement de la rivière lors d'une forte inondation par exemple. En effet, lors des crues normales, l'écoulement des eaux en lit mineur augmente et déborde sur le lit majeur (BULL, 1997 ; LARONNE *et al.*, 1994 ; SERRAT et DEPRAETERE, 1997), laissant généralement une mince couche de sédiments fins (sable, limons, etc.) sur les terrasses. Une des difficultés est donc d'identifier chacune des couches sédimentaires provenant de crues printanières ou de fortes inondations. Enfin, soulignons que le principal problème dans la reconstruction chronologique des paléo-inondations provient essentiellement de la difficulté de trouver des couches ou des débris de matière organique dans les séquences sédimentaires, ce qui rend difficile la datation chronologique des événements associés aux inondations.

#### 4.1.2 Les méthodes paléoécologiques

Les différentes approches paléoécologiques utilisées dans l'étude des paléo-inondations consistent à combiner différents indicateurs biologiques afin de reconstituer les environnements fluviaux anciens. Les indicateurs les plus fréquemment utilisés sont les microfossiles (pollens, diatomées, etc.) et les macrorestes (fragments de plantes ou insectes). L'analyse dendrochronologique et la lichénométrie sont aussi des méthodes utilisées bien que moins fréquemment. Les organismes résiduels enfouis dans les dépôts sédimentaires constituent en effet des indicateurs biologiques valables pouvant renseigner sur les conditions environnementales et climatiques du passé (BARTLEIN et WEBB, 1982 ; BERNADO et WEBB, 1982 ; ELY *et al.*, 1996 ; GRIMM *et al.*, 1995 ; HUPP, 1988 ; KNOX, 1985). Les travaux de KNOX (1985) et d'autres chercheurs (BARTLEIN et WEBB, 1982 ; WEBB *et al.*, 1988) ont par exemple utilisé les analyses polliniques pour reconstituer des environnements fluviaux reliques. L'abondance de certaines espèces dans les diagrammes polliniques peut en effet fournir des indications sur les conditions hydrologiques et climatiques qui prévalaient dans les sites étudiés et tenter de les associer à certaines périodes de l'Holocène. Par exemple, les diagrammes polliniques réalisés dans la vallée supérieure de la rivière Mississippi, indiqueraient une augmentation des conditions froides et humides entre 6 000 et 4 500 ans BP et seraient associés à des phases d'inondations majeures pour cette période (BARTLEIN et WEBB, 1982 ; KNOX, 1985). Les macrorestes (graines, diaspores, etc.) sont aussi utilisés dans la reconstitution des paléo-inondations. Ces fragments organiques peuvent se retrouver dans les dépôts alluviaux et fournir des indications sur les conditions paléoenvironnementales. Ils peuvent être identifiés à certaines conditions climatiques spécifiques et être combinés à des méthodes de datation, lesquelles peuvent fournir un cadre chronologique des événements anciens (BARTLEIN et WEBB, 1982 ; GRIMM *et al.*, 1995 ; KNOX, 1985).



Outre ces indicateurs biologiques, les lichens et leur taux de croissance ont aussi été utilisés pour la reconstruction des paléo-inondations (JARRETT et TOMLINSON, 2000 ; JOHNSON et WARBURTON, 2002 ; MACKLIN *et al.*, 1992 ; WAYTHOMAS et JARRETT, 1994). La lichénométrie est une technique généralement utilisée en géomorphologie glaciaire et permet d'établir une datation relative en évaluant le taux de croissance des lichens qui poussent sur les substrats rocheux (blocs et cailloux). Certains chercheurs ont appliqué cette technique pour déterminer la fréquence de certaines inondations anciennes (HARVEY *et al.*, 1984 ; INNES, 1983 ; MACKLIN *et al.*, 1992). Ainsi, on tente d'évaluer la chronologie des phases d'inondation en se basant sur la période qui s'écoule entre le début de la colonisation des lichens sur les substrats et le taux de croissance atteint par ces organismes. L'emplacement des galets et cailloux situés le long des terrasses fluviales peut servir aussi d'indice additionnel pour évaluer les limites maximales atteintes par les fortes crues et les inondations.

Enfin, certains chercheurs ont utilisé la dendrochronologie<sup>1</sup> pour connaître l'âge et la formation des plaines inondables (ASTRADE et BÉGIN, 1997 ; COSTA, 1978 ; GOTTESFELD, 1996 ; GOTTESFELD et GOTTESFELD, 1990 ; GRIMM *et al.*, 1995 ; HARRISON et REID, 1967 ; HUPP, 1988 ; JARRETT, 1990 ; ST. GEORGES et NIELSON, 2000 ; YANOSKY et JARRETT, 2002). Cette méthode consiste à déterminer l'âge des peuplements arborescents qui occupent les plaines alluviales en calculant le nombre de cernes de croissance des arbres matures, sachant que chaque cerne de croissance de l'arbre correspond à une année. La dendrochronologie s'avère en ce sens une méthode de datation précise (soit à l'année près) pour déterminer les événements hydrologiques (YANOSKY et JARRETT, 2002). L'application de cette méthode est d'autant plus intéressante si l'on trouve dans les dépôts des terrasses fluviales, d'anciens troncs d'arbres enfouis qui peuvent permettre d'établir une chronologie plus longue. Enfin, les cicatrices sur les troncs d'arbres laissées par le passage des glaces lors des crues printanières peuvent servir d'indication sur les niveaux maximums atteints par les eaux (HARRISON et REID, 1967 ; HUPP, 1988). Certains chercheurs ont même utilisé les marques laissées sur les troncs par le transport des billes de bois en rivière pour identifier les niveaux maximums atteints par les inondations (GOTTESFELD, 1996 ; MCCORD, 1990).

#### 4.1.3 Les méthodes pédologiques

La description morphologique des sols enfouis (paléosols) le long des terrasses fluviales et leur degré de maturité constituent aussi des indices pédogénétiques qui permettent de reconstituer la chronologie des paléo-inondations. Des auteurs comme HEINE et HEINE (2002) ont utilisé par exemple des critères pédologiques pour établir la chronoséquence des événements d'inondation dans le Désert du Namib (Namibie). La présence de couches indurées (croûtes de gypses et de sels) intercalées dans les limons de crues suggère des phases de stabilité des terrasses fluviales. Ils ont pu reconnaître ainsi différentes périodes associées à des événements d'inondations majeures. MCQUEEN *et al.*

1. On attribue à A.E. DOUGLAS (1919) le développement de la méthode dendrochronologique (voir RAAP et HILL, 1998) et les travaux de R. SIGAFOOS (1964) sont parmi les premiers travaux permettant d'identifier la fréquence des inondations à partir de l'analyse dendrochronologique (YANOSKY et JARRETT, 2002).

(1993) et CHATTERS et HOOVER (1986) ont utilisé eux aussi des critères pédologiques (texture, couleur, présence de lits organiques, etc.) pour reconstituer des périodes d'inondation. De manière générale, la présence de sols enfouis dans les sédiments des terrasses correspond à des périodes de stabilité indiquant l'absence de phases d'inondation. Dans les séquences sédimentaires, on peut ainsi retrouver plusieurs paléosols intercalés dans les couches de sédiments déposés lors de phases d'inondations successives. Les travaux de KNOX (1985, 2000) et de ELY (1997) par exemple ont tenté d'interpréter à travers les séquences sédimentaires, la formation des paléosols à des périodes climatiques « sèches », entrecoupées par des périodes climatiques plus « humides » favorisant l'augmentation des inondations et qui se traduisent notamment par la mise en place de plusieurs couches de sédiments.

La présence et l'épaisseur d'horizons illuviaux (cf. horizons d'accumulation enrichis par illuviation en éléments fins ou amorphes (ex. argile, oxyde de fer et d'aluminium, humus, etc.) et habituellement qualifiés d'horizon B), et la concentration des oxydes de fer dans ces horizons d'accumulation, constituent aussi des paramètres pédogénétiques utilisés pour évaluer le taux de développement des sols enfouis dans les terrasses fluviales (JARRETT et TOMLINSON, 2000). Ces indicateurs combinés aux séquences stratigraphiques, par exemple, permettent de présumer de l'âge relatif des terrasses et aussi d'évaluer les phases d'exondation (formation de sols) et celles associées aux inondations (accumulation des sédiments de crues).

#### 4.2 Les outils de datation ( $^{14}\text{C}$ et thermoluminescence)

La méthode de datation radiocarbone ( $^{14}\text{C}$ ) est fréquemment utilisée pour établir la chronologie des séquences stratigraphiques en géologie et en géomorphologie (STUIVER *et al.*, 1998). Toutefois, son utilisation se limite à des dépôts relativement récents, soit de l'ordre de 60 Ka (STUIVER et REIMER, 1993). Dans l'étude des paléo-inondations, l'utilisation des datations au  $^{14}\text{C}$  s'avère nécessaire pour établir une chronologie relativement précise des périodes d'inondation (BAKER *et al.*, 1985 ; ELY *et al.*, 1992). À cet effet, on compte un grand nombre de travaux qui ont utilisé cette méthode afin d'établir des chronologies locales ou régionales des événements d'inondation (BAKER *et al.*, 1985, 1988 ; ELY *et al.*, 1992 ; GREENBAUM *et al.*, 2000 ; HEINE et HEINE, 2002 ; HOUSE et BAKER, 2001 ; KNOX, 1993 ; OSTENAA *et al.*, 2002). Ainsi, la présence de dépôts organiques (couches ou débris de matière organique) à l'intérieur des sédiments déposés par les inondations successives permet d'établir des séquences chronologiques. La difficulté première de cette méthode provient de l'incapacité de trouver suffisamment de matière organique pour permettre la datation, ou encore, de ne pouvoir observer aucune trace de dépôts organiques dans les séquences sédimentaires. Ce type de problème est d'ailleurs soulevé par différents auteurs qui ont travaillé à reconstituer des chronologies sur les inondations des régions chaudes (GREENBAUM *et al.*, 2001 ; KOCHER et BAKER, 1988). En effet, dans les environnements désertiques ou semi-désertiques, ces couches organiques se font souvent rares en raison des conditions climatiques qui ne favorisent pas la formation d'une épaisse couverture végétale au sol. Mais ce problème n'est pas exclusif aux régions désertiques, il se rencontre aussi dans les milieux humides (KNOX, 2000 ; SAINT-LAURENT et LAVOIE, 2003 ; YANG *et al.*, 2000). L'absence de

couches de matière organique ou de débris organiques dans les sédiments s'explique soit par une durée trop courte de formation du couvert végétal entre les phases d'inondation, ou par l'érosion des couches et débris organiques par l'action de divers phénomènes naturels qui agissent parfois de façon concomitante (ruissellement, glissement, bioturbation, érosion fluviale, oxydation, etc.). Dans de telles circonstances, il faut s'appuyer sur d'autres méthodes de datation qui présentent d'autres particularités d'application (thermoluminescence,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ , etc.). Par exemple, les techniques par thermoluminescence fréquemment utilisées en archéologie (RAAP et HILL, 1998) sont parfois utilisées dans les travaux en paléo-inondations. Toutefois, cette technique demande de trouver des pièces archéologiques (artéfacts) *in situ* sur les sites étudiés, ce qui s'avère plutôt rare (ELY *et al.*, 1996 ; PORAT *et al.*, 1996). La présence d'artéfacts dans les terrasses fluviales peut aider par exemple à dater l'âge des dépôts d'inondation. Enfin, les techniques de datation par luminescence qui utilisent les défauts cristallins des grains de quartz ou de feldspaths s'avèrent à ce jour peu précises pour les sédiments fluviaux (LAMOTHE, 1996). Les chercheurs qui ont eu à utiliser cette technique pour la datation des sédiments d'inondation, mentionnent des marges d'erreur importantes comparativement aux dates obtenues par datation radiocarbone (GREENBAUM *et al.*, 2000, 2001 ; PORAT *et al.*, 1996).

#### 4.3 Les méthodes de reconstitution du débit de pointe des paléo-inondations

Il existe différentes méthodes et techniques de modélisation pour tenter de reconstituer les régimes fluviaux anciens (voir tableau 2), lesquelles ont été d'abord développées en hydrologie pour l'étude des cours d'eau soumis aux conditions actuelles. Dans ces modèles, on cherche le plus souvent à définir les débits maximums et les fréquences des inondations. Plusieurs travaux ont tenté de définir les anciens débits maximums à l'aide de diverses méthodes ou modèles mathématiques disponibles. Des auteurs comme YANG *et al.*, (2000), par exemple, ont utilisé la méthode de calcul de pente et de surface (*slope-area method*) pour évaluer les débits des anciennes inondations. Pour calculer les débits, ils utilisent en tout premier lieu l'équation de Manning (voir appendice A), développée pour des écoulements uniformes. À cet égard, WEBB et JARRETT (2002, p. 115) nous rappellent les premières applications de cette méthode : « ...Manning's equation was developed for uniform flow, for which discharge,  $n$ ,  $R$  and  $S_f$  do not vary over a specified reach. Uniform flow is characterized by parallel elevations of the channel bed, water-surface profile, and energy-grade lines ». La méthode de calcul de pente et de surface est conçue pour des cours d'eau qui se caractérisent par un écoulement uniforme. Dans l'étude de YANG *et al.* (2000), cette méthode de calcul a été appliquée avec succès sur la rivière Jaune (section *Xiaolangdi*) qui présente un débit uniforme. D'autres chercheurs ont aussi utilisé cette méthode de calcul pour déterminer les anciens débits des cours d'eau et ont combiné leur analyse avec des indicateurs biophysiques observés sur le terrain (CHATTERS et HOOVER, 1986 ; GRIMM *et al.*, 1995 ; HEINE et HEINE, 2002 ; O'CONNOR et WEBB, 1988).

**Tableau 2** Principales méthodes mathématiques et modèles utilisés pour les études en paléo-inondations.**Table 2** Principal mathematical methods and models used in paleoflood studies.

Méthodes et modèles mathématiques	Applications	Auteurs
Méthode de calcul de pente et de surface – Équation de Manning-Strickler	Évaluation des débits	Heine et Heine (2002)
Méthode « Step backwater » Programme HEC-RAS – Hydrological Engineering Center, US	Évaluation des débits	House et Baker (2001)
Méthode de calcul de pente et de surface – Équation de Manning	Évaluation des débits	Yang <i>et al.</i> (2000) Grimm <i>et al.</i> (1995) Chatters et Hoover (1986)
Méthode « Step backwater » Programme HEC-2 – Hydrological Engineering Center, US Log-Pearson Type III (LP3), Courbe-enveloppe de crues (précipitations maximales)	Évaluation des débits	Webb <i>et al.</i> (2002) Wohl <i>et al.</i> (1994) Ely et Baker (1985)
Programme HEC-2 ( <i>Water surface profiles</i> ) – Hydrological Engineering Center, US	Évaluation des débits	Enzel <i>et al.</i> (1993)
Méthode du maximum de vraisemblance Programme MAX (voir Stedinger <i>et al.</i> 1988) Programme EMA (voir Cohn <i>et al.</i> (1997), Log-Pearson type III (LP3)	Analyse de la fréquence des crues	McQueen <i>et al.</i> (1993)
		Blainey <i>et al.</i> (2002) Webb <i>et al.</i> (2002) Greenbaum <i>et al.</i> (2000, 2001) Frances <i>et al.</i> (1994)
	Analyse de la fréquence des crues	Alila et Mtraoui (2002), Jarrett et Tomlinson (2000)
Expérimentation d'un nouveau modèle basé sur des données hydrométriques et analyse des fréquences d'inondation	Développement d'un modèle mathématique	Stevens (1994)
Comparaison de différentes méthodes (méthode des moments ajustés, simulation Monte Carlo, etc.)	Analyse de la fréquence des crues	Stedinger et Cohn (1986) Ouarda <i>et al.</i> (1998)

D'autres chercheurs (ELY et BAKER, 1985 ; HOUSE et BAKER, 2001 ; KITE *et al.*, 2002 ; KUTIJA, 2003 ; LANG *et al.*, 2003 ; O'CONNOR *et al.*, 1986 ; PARTRIDGE et BAKER, 1985 ; STEVENS, 1994 ; WEBB et JARRETT, 2002 ; WOHL *et al.*, 1994) utilisent plutôt la méthode de calcul de « résolution itérative » (*Step backwater method*). Cette dernière permet d'établir (par simulation) le profil longitudinal de la surface libre et ce, afin de reconstituer les débits des inondations anciennes, et elle est mieux adaptée aux cours d'eau où les effets de stockage ou de déformation des hydrogrammes ne sont plus négligeables. WEBB et JARRETT (2002, p. 114) mentionnent que la méthode de « résolution itérative » (*Step backwater method*) et la méthode « profondeur-critique » (*Critical-depth*) sont largement utilisées dans la reconstruction des débits des paléo-inondations, « ...The step-backwater and critical-deph methods are widely used in paleoflood discharge reconstructions ». Enfin, ces différents travaux combinent généralement d'autres approches méthodologiques, notamment l'utilisation des indicateurs géomorphologiques (hauteur des terrasses, stratigraphie, granulométrie des sédiments, etc.) et biologiques (microfossiles, marcorestes, etc.), afin de vérifier les résultats obtenus par ces différents modèles hydrologiques.

## APPENDICE A

Équation de Manning :

$$V = 1/n S^{1/2} R^{2/3} \quad (1)$$

$$K = 1/n S^{1/2} \quad (2)$$

Où  $V$  : est la vitesse moyenne ;  $n$  : facteur de rugosité ;  $R$  : le rayon hydraulique ;  $S$  : la pente de la surface de l'eau ;  $K$  : le facteur de vitesse qui est fonction de  $n$  et  $S$  de l'équation (2).

Ensuite, le débit est calculé par :

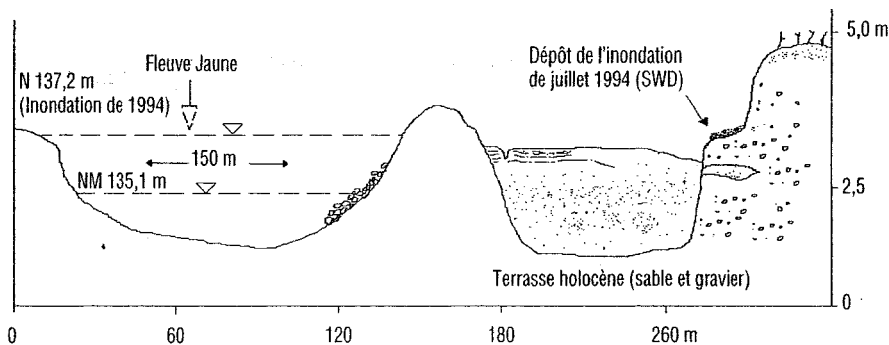
$$Q = V_1 S_1 + V_2 S_2 \quad (3)$$

$$= K_1 R_1^{2/3} S_1 + K_2 R_2^{2/3} S_2$$

$$= K_1 R_1^{2/3} S_1 + K_2 R_2^{2/3} (H_2 - H_1)$$

$$\times (2L + \Delta L)/2$$

où  $V$ ,  $S$ ,  $R$  et  $K$  sont les mêmes que l'équation (1) et (2), alors que 1 et 2 représentent chacun le paramètre du chenal et le débordement du lit principal (*flow-overbank*) respectivement.  $Q$  : débit calculé ;  $H_1$  : élévation de la surface du chenal ;  $H_2$  : élévation de la surface inondée en utilisant l'élévation de chaque dépôt d'inondation à sa surface avec les pentes longitudinales des deux côtés des terrasses fluviales ;  $L$  : longueur transversale du chenal (150 m) ; et  $\Delta L$  : distance entre la surface du chenal (niveau moyen (135,1 m) et la surface maximale (137,2 m) atteinte par l'inondation de juillet 1994 par exemple (voir YANG *et al.* 2000, p. 87).



Source : YANG *et al.* (2000) modifié par les auteurs.

**Figure 2** Profil transversal du fleuve Jaune (Chine), section Xianlangdi. Le dépôt d'inondation sur la rive droite (montré par la flèche) provient de l'inondation majeure de juillet 1994 et est évalué à un débit de 5 490 m<sup>3</sup>/s. Source : YANG *et al.* (2000) modifié par les auteurs.

*Cross-section of the Yellow River (China), Xianlangdi section. Slack-water depositional unit on the right bank (show by arrow) deposited by a large flood of approximately 5 490 m<sup>3</sup>/s in July 1994. Source: YANG *et al.* (2000) modified by the authors.*

Il existe également différents programmes informatiques qui peuvent déterminer les anciens débits des inondations. L'un d'entre eux, le HEC-2 (Hydrologic Engineering Center, 1982 – *Water Surface Profiles*), est utilisé pour calculer le profil de surface de différents types de cours d'eau (GREENBAUM *et al.*, 2001 ; WOHL *et al.*, 1994). La procédure d'ordination utilisée, qui est une méthode standard de calcul, est basée sur la prise en compte de différents paramètres, dont la géométrie du chenal (largeur, profondeur), la hauteur des terrasses alluviales, la rugosité du lit, la vitesse d'écoulement, etc. (ELY et BAKER, 1985 ; MCQUEEN *et al.*, 1993, p. 141). Il existe aussi le programme MAX (*Maximum likelihood analysis*) développé par STEDINGER *et al.* (1988), lequel est utilisé pour l'analyse de la fréquences des crues (voir aussi COHN et STEDINGER, 1987). Ce programme intègre des données fréquence/magnitude provenant de différentes sources (ex. stations de jaugeage, chroniques historiques). Il combine les valeurs maximales des débits enregistrés ou estimés et fournit ainsi une appréciation des variations du régime hydrologique du cours d'eau étudié sur une certaine période de temps (FRANCES *et al.*, 1994 ; GREENBAUM *et al.*, 2001 ; OUARDA *et al.*, 1998). Ce programme a été largement utilisé dans les travaux de GREENBAUM *et al.* (2000, 2001) pour la vallée d'Arava et le bassin Nahal Zin dans le désert du Negev. Enfin, il existe aussi le programme EMA (*Expected moments algorithm*) qui a été développé par COHN *et al.* (1997). Ce modèle s'apparente au programme MAX sauf que les intervalles de récurrence des inondations sont ajustées à des échelles plus longues (ex. 5 000 ans). La performance de ces deux programmes (MAX et EMA) a d'ailleurs été analysée en détail par BLAINEY *et al.* (2002).

Enfin, on peut mentionner que certains chercheurs complètent leurs modèles mathématiques en utilisant des documents cartographiques et des photographies aériennes, lesquels permettent de vérifier leurs analyses mathématiques en s'appuyant sur des évidences de terrain (HOUSE et BAKER, 2001 ; WAYTHOMAS et JARRETT, 1994). Ces documents ne peuvent toutefois couvrir que des périodes relativement courtes (soit les soixante ou cinquante dernières années). En fait, l'utilisation de tels documents permet surtout de vérifier les changements récents le long des terrasses fluviales survenus suite à une inondation catastrophique ou alors à évaluer la surface des plaines inondables par exemple (BROOKS et LAWRENCE, 2000 ; CAIN et BEATTY, 1968 ; HOUSE et BAKER, 2001 ; JOHNSON et WARBURTON, 2002).

#### 4.4 • Limite des approches utilisées dans la reconstitution des paléo-inondations

La reconstitution des paléo-inondations demeure un travail fastidieux qui doit faire appel non seulement à des approches et méthodes variées, mais aussi qui exige des travaux de terrain minutieux et une bonne compréhension des environnements fluviaux. Aussi, les difficultés peuvent être nombreuses. Il suffit de penser à la qualité des sites, au manque d'évidences ou traces visibles sur le terrain ou encore à la détérioration des sites étudiés, soit par des processus naturels (érosion des terrasses fluviales, glissements de terrain, altération par des crues successives, etc.), soit par des actions anthropiques (terrassement, mise en culture, déboisement des rives, etc.).

La chronologie des paléo-inondations peut aussi s'avérer ardue, notamment par la difficulté d'individualiser chaque événement d'inondation. Par

exemple, la superposition de plusieurs inondations successives sur une courte période de temps (une décennie par exemple) rend difficile de discriminer chacun des événements qui se sont produits. Ce genre de problème se rencontre notamment dans les milieux tempérés froids soumis à un régime pluvio-nival (SAINT-LAURENT et LAVOIE, 2003 ; WERRITTY *et al.*, 2003). L'identification des différents événements d'inondation dans les séquences stratigraphiques peut s'avérer aussi difficile, en raison notamment de la faible différenciation entre les dépôts. Enfin, STARKEL (1996, p. 12) soulève la difficulté d'identifier chaque événement d'inondation : « *...In the case of the famous Missoula flood it is not know whether it was a single or several events, close or distant time* ».

Certaines autres difficultés surviennent quant à l'interprétation des niveaux atteints par les inondations anciennes. Il faut en effet tenir compte des diverses modifications (changement dans la géométrie du chenal par exemple) qu'a pu subir le cours d'eau dans son évolution. À ce titre, BLAINEY *et al.* (2002, p. 164) rappellent que l'évaluation des débits pour la reconstitution des paléo-inondations peut être biaisée par une méconnaissance des changements survenus du cours d'eau : « *...Errors in discharge reconstruction include uncertainties in indirect-discharge estimates caused by channel change and/or mis-specification of roughness values...* ». Enfin, WEBB et JARRETT (2002) mentionnent que le comblement des lits des rivières doit être pris en compte dans l'évaluation des niveaux atteints lors des inondations anciennes. Ces chercheurs estiment que plusieurs rivières du sud-ouest américains ont subi un rehaussement de leur niveau de base depuis plusieurs milliers d'années : « *...Alluvial channels in the southwestern United States are unstable and have fluctuated up to 30 m in base level over the last several thousand years.* » (WEBB et JARRETT, 2002, p. 113). Enfin, certains modèles mathématiques présentent certaines difficultés méthodologiques ou d'applications. C'est le cas notamment de la méthode du maximum de vraisemblance (COHN et STEDINGER, 1986) qui utilise l'analyse fréquentielle pour modéliser de l'information historique imprécise sur les crues. OUARDA *et al.* (1998, p. 45) émettent quelques réserves quant à l'utilisation de cette méthode. Selon eux, la plus « *grande faiblesse de cette méthode porte sur l'existence des maximums locaux de la fonction de vraisemblance* », ce qui impliquerait des « *difficultés pour trouver une solution optimale* ».

Toutes ces difficultés qui peuvent être rencontrées dans la reconstitution des paléo-inondations amènent à réfléchir sur la précision de certains événements (fréquence et magnitude des inondations, durée, etc.) et demandent aux chercheurs qui travaillent dans ce domaine une certaine vigilance quant aux interprétations qu'ils doivent poser sur ces événements du passé.

## 5 – CONCLUSION

L'étude des paléo-inondations demande de mettre en commun différentes méthodes et techniques pouvant permettre de reconstituer des environnements fluviaux plus anciens. Les différents indicateurs physiques et biologiques utilisés impliquent nécessairement une approche multidisciplinaire qui

sans elle rendrait difficile de telles reconstitutions paléoenvironnementales. La reconstitution des conditions hydrologiques passées s'avère par ailleurs une tâche relativement difficile puisque plusieurs indices morphologiques, sédimentologiques, stratigraphiques ou autres, ont été altérés ou encore modifiés soit par des agents naturels soit par des agents anthropiques.

La reconstitution chronologique à l'échelle du millénaire pour des événements majeurs tels que les fortes inondations ou les crues exceptionnelles, n'apparaît possible qu'en utilisant différentes approches méthodologiques qui sont empruntées à divers champs disciplinaires (géomorphologie, climatologie, pédologie, écologie, etc.). La nécessité d'utiliser des méthodes et des techniques variées (stratigraphie, sédimentologie, datation radiocarbone, dendrochronologie, etc.) s'explique par le fait qu'il est difficile de reconstituer des environnements anciens sans faire appel à différents indicateurs biophysiques. La reconstitution de chronologies plus longues (soit à l'échelle du millénaire) permet, entre autres, de mieux comprendre le déroulement des événements hydrologiques du passé et sans doute de mieux prévoir les conséquences de changements rapides qu'annonce notamment le réchauffement planétaire.

Enfin, bien que ces méthodes et techniques soient généralement associées aux disciplines de la géologie, de la géomorphologie ou de la biologie, on comprend qu'elles constituent des outils de recherche incontournables pour développer l'ensemble des travaux en paléohydrologie. Le développement de ces approches multidisciplinaires ouvre par ailleurs des avenues de recherche fort intéressantes et qui méritent d'être davantage explorées dans le domaine de l'hydrologie en général.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier les trois réviseurs (anonymes) ainsi que la rédaction de la revue pour les commentaires constructifs. Cette revue de la littérature s'inscrit à l'intérieur d'un programme de recherche financé par le CRSNG et les fonds institutionnels de recherche de l'UQTR.



## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AGASSE E., 2003. Historical evidence of extreme flood events from the 17<sup>th</sup> to the 20<sup>th</sup> century in western France (Normandy). Paleofloods, Historical data and climatic variability: Applications in flood Risk Assessment (PHEFRA), Colloque international, Barcelone, Espagne, 16-19 octobre 2002, 99-106.
- AGASSIZ L., 1838. Upon glaciers, moraines, and erratic blocks. *Edinburg New Philosophy Journal*, 24, 364.
- ALILA Y., MTIRAQUI A., 2002. Implications of heterogeneous flood-frequency distributions on traditional stream-discharge prediction techniques. *Hydrology Processes*, 16, 1065-1084.
- ARNAUD-FASSETTA G., 2002. Geomorphological records of a "flood-dominated regime" in the Rhône Delta (France) between the 1<sup>st</sup> century BC and the 2<sup>nd</sup> century AD. What correlations with the catchment paleohydrology? *Geodynamica Acta* 15, 79-92.
- ASTRADE L., BÉGIN Y., 1997. Tree-ring response of *Populus tremula* L. and *Quercus robur* L. to recent spring floods of the Saone River. France, *Écoscience*, 4, 232-239.
- BAKER V.R., 2000. Paleoflood hydrology and the estimation of extreme floods. In: "Inland flood hazards", WOHL E.E. [Ed], pp. 359-377.
- BAKER V.R., BENITO G., RUDROY A.N., 1993. Paleohydrology of Late Pleistocene superflooding, Altay Mountains, Siberia. *Science*, 259, 348-350.
- BAKER V.R., KOCHER R.C., PATTON P.C., 1988. Flood geomorphology. John Wiley, New York.
- BAKER V.R., 1987. Paleoflood hydrology and extraordinary flood events. *Journal of Hydrology*, 96, 79-99.
- BAKER V.R., PICKUP G., POLACH H.A., 1985. Radiocarbon dating of flood events, Katherine Gorge, northern Territory, Australia. *Geology*, 13, 344-347.
- BARTLEIN P.J., WEBB T., 1982. Holocene climatic changes estimated from pollen data from the northern Midwest. In: "Quaternary History of the Driftless Area", J.C. KNOX J.C., CLAYTON L. and MICHELSON D.M. [Eds], pp. 83-87.
- BENITO G., THORNDYCRAFT V.R., RICO M., SOPENA A., SANCHEZ Y., CASAS M., 2003. Palaeoflood hydrology applications for flood risk assessment in Spanish Mediterranean rivers. Third International Paleoflood Workshop (Abstract), Hood River, Oregon, August 1-7, 2003.
- BENITO G., MACHADO M. J., PEREZ-GONZALEZ A., SOPENA A., 1998. Paleoflood hydrology of the Tagus River, central Spain. In: "Palaeohydrology and Environmental Change", BENITO G., BAKER V.R. and GREGORY K.J. [Eds], 317-333.
- BERNADO P.J., WEBB T., 1982. Holocene climatic changes estimated from pollen data from the northern Midwest. In: "Quaternary History of the Driftless Area", KNOX J.C., CLAYTON L. and MICHELSON D.M. [Eds], pp. 83-87.
- BLAINEY J.B., WEBB R.H., MOSS M.E., BAKER V.R. 2002. Bias and information content of paleoflood data in flood-frequency analysis. In: "Ancient floods, modern hazards: principles and application of paleoflood hydrology", HOUSE P.K., WEBB R.H., BAKER V.R. and LEVISH D.R. [Eds], Water Science and Application 5, American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 161-174.
- BRETZ J.H., 1923. The channelled scablands of the Columbia Plateau. *Journal of Geology*, 33, 97.
- BROOKS G.R., LAWRENCE D.E., 2000. Geomorphic effects of flooding along reaches of selected rivers in the Saguenay region, Québec, July 1996. *Géographie physique et Quaternaire*, 54, 281-299.
- BROWN S.L., BIERMAN P.R., LINI A., SOUTHERN J., 2000. 10 000 yr record of extreme hydrologic events. *Geology*, 28, 335-338.
- BRUNETON H., ARNAUD-FASSETTA G., PROVANSAL M., SISTACH D., 2002. Geomorphological evidence for fluvial change during the Roman period in the lower Rhône Valley. *Catena*, 45, 287-312.

- BULL L.J., 1997. Magnitude and variation in the contribution of bank erosion to the suspended sediment load of the River Severn, UK. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22, 1109-1123.
- CAIN J.M., BEATTY M.T., 1968. The use of soil maps in the delineation of floods plains. *Water Resources Research*, 4, 173-182.
- CHATTERS J.C., HOOVER K.A., 1994. Response of the Columbia River fluvial system to Holocene climatic change. *Quaternary Research*, 37, 42-59.
- CHATTERS J.C., HOOVER K.A., 1986. Changing late Holocene flooding frequencies on the Columbia River, Washington. *Quaternary Research* 26, 309-320.
- COHN T.H., LANE W.L., BAIER W.G., 1997. An algorithm for computing moments-based flood quantile estimated when historical information is available. *Water Resources Research*, 33, 2089-2096.
- COHN T.H., STEDINGER J.R., 1987. Use of historical information in a maximum-likelihood framework. *Journal of Hydrology*, 96, 215-223.
- COSTA J.E., 1987. A history of paleoflood hydrology in the United States, 1800-1970. In: "The History of Hydrology", LANDA E.R. and INCE S. [Eds], pp. 49-53.
- COSTA J.E., 1978. Holocene stratigraphy in flood-frequency analysis. *Water Resources Research*, 14, 626-632.
- DANA J.D., 1882. The flood of the Connecticut River Valley from the melting of the Quaternary glacier. *American Journal of Science* (parts 1 & 2), 123, 87-179.
- DOUGLAS A.E., 1919. Climate cycles and tree growth. Washington, DC, Carnegie Institution of Washington.
- DUBAND D., 2003. Extreme rainfall and flood events in autumn during the 19<sup>th</sup> and 20<sup>th</sup> centuries in basins of southern Europe influenced by mediterranean meteorological conditions. Paleofloods, Historical data and climatic variability: Applications in flood Risk Assessment (PHEFRA), Colloque international, Barcelone, Espagne, 16-19 octobre 2002, 313-320.
- ELY L.L., 1997. Response of extreme floods in the southwestern United States to climatic variations in the late Holocene. *Geomorphology*, 19, 175-201.
- ELY L.L., ENZEL Y., BAKER V.R., KALE V.S., MISHRA, S., 1996. Changes in the magnitude and frequency of late Holocene monsoon floods on the Narmada River, central India. *Geological Society of America Bulletin*, 108, 1134-1148.
- ELY L.L., ENZEL Y., BAKER V.R., CAYAN D.R., 1993. A 5000-year record of extreme floods and climate change in the southwestern United States. *Science*, 262, 410-412.
- ELY L. L., WEBB R. H., ENZEL Y., 1992. Accuracy of post-bomb <sup>137</sup>Cs and <sup>14</sup>C in dating fluvial deposits. *Quaternary Research*, 38, 196-204.
- ELY L.L., BAKER V.R., 1985. Reconstructing paleoflood hydrology with slackwater deposits : Verde River, Arizona. *Physical Geography*, 5, 103-126.
- ENZEL Y., ELY L.L., BAKER V.R., HOUSE P.K., WEBB R.H., 1993. Paleoflood evidence for a natural upper bound to flood magnitudes in the Colorado River Basin. *Water Resources Research*, 29, 2287-2297.
- ENZEL Y., 1992. Flood frequency of the Mojave River and the formation of late Holocene playa lakes, southern California, USA. *The Holocene* 2, 11-18.
- FRANCES, F., SALAS J.D., BOES D.C., 1994. Flood frequency analysis with systematic and historical or paleoflood data based on the two-parameter general extreme value models. *Water Resources Research*, 30, 1653-1664.
- GALE S.J., BAINBRIDGE A., BAINBRIDGE S., 1990. Megafloods in inland eastern Australia. *Zeitschrift für Geomorphologie*, N.F. 38, 1-11.
- GODARD A., 1995. Le système bassin-versant, fonctionnement naturel, interventions humaines. *Annales de Géographie*, 581-582, 3-5.
- GORDON F.T., 1993. Glacial Lake Agassiz: The Northwest Outlet and Paleoflood Spillway, N.W. Saskatchewan and N.E. Alberta. Th. Doct. University of Calgary, Canada, 168 p.
- GOTTESFELD A.S., 1996. British Columbia flood scars : maximum flood-stage indicators. *Geomorphology*, 14, 319-325.

- GOTTESFELD A.S., GOTTESFELD L.D., 1990. Floodplain dynamics of a wandering river, dendrochronology of the Morice River, British Columbia, Canada. *Geomorphology*, 3, 159-179.
- GREENBAUM N., ENZEL Y., SCHICK A.P., 2001. Magnitude and frequency of paleofloods and historical floods in the Arava basin, Negev Desert, Israel. *Journal of Earth Science*, 50, 159-186.
- GREENBAUM N., SCHICK A.P., BAKER V.R., 2000. The palaeoflood record of a hyperarid catchment, Nahal Zin, Negev Desert, Israel. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25, 951-971.
- GRIMM M.M., WOHL E.E., JARRETT R.D., 1995. Coarse-sediment distribution as evidence of an elevation limit for flash flooding, Bear Creek, Colorado. *Geomorphology*, 14, 199-210.
- GROSSMAN M.J., 2001. Large floods and climatic change during the Holocene on the Ara River, Central Japan. *Geomorphology*, 39, 21-37.
- HARRISON S.S., REID J.R., 1967. A flood-frequency graph based on tree-scar data. *Proceedings N.D. Academy Science*, 21, 23-33.
- HARVEY A.M., ALEXANDER R.W., JAMES P.A., 1984. Lichens, soil development and the age of Holocene valley floor landforms: Howgill Fells, Cumbria. *Geografiska Annaler*, 66A, 353-366.
- HEINE K., HEINE J.T., 2002. A paleohydrologic reinterpretation of the Homeb Silts, Kuiseb River, central Namib Desert (Namibia) and paleoclimatic implications. *Catena*, 48, 107-130.
- HOUSE P.K., WEBB R.H., BAKER V.R., LEVISH D.R., 2002a. Ancient floods, modern hazards: principles and applications of paleoflood hydrology. Water Science and Application 5, American Geophysical Union, Washington, DC.
- HOUSE P.K., PEARTHREE P.A., KLAWON J.E., 2002b. Historical flood and paleoflood chronology of the Lower Verde river, Arizona: stratigraphic evidence and related uncertainties. In: "Ancient floods, modern hazards: principles and application of paleoflood hydrology", HOUSE P.K., WEBB R.H., BAKER V.R. and LEVISH D.R. [Eds], Water Science and Application 5, American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 267-294.
- HOUSE P.K., BAKER V.R., 2001. Paleohydrology of flash floods in small desert watersheds in western Arizona. *Water Resources Research*, 37, 1825-1839.
- HUPP C.R., 1988. Plant ecological aspects of flood geomorphology and paleoflood history. In: "Flood geomorphology", BAKER V.R., KOCHER R.C. and PATTON P.C. [Eds], pp. 393-402.
- HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER 1982. HEC-2 Water surface profiles: Program user's manual. US Army Corps of Engineers, Davis, CA.
- INNES J. L., 1983. Lichenometric dating of debris flow activity in the Scottish Highlands. *Earth Surface Processes and Landforms*, 8, 579-588.
- JARRETT R.D., ENGLAND J.F.(Jr), 2002. Reliability of paleostage indicators for paleoflood studies. In: "Ancient floods, modern hazards: principles and application of paleoflood hydrology", HOUSE P.K., WEBB R.H., BAKER V.R. and LEVISH D.R. [Eds], Water Science and Application 5, American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 267-294.
- JARRETT R.D., TOMLINSON E.M., 2000. Regional interdisciplinary paleoflood approach to assess extreme flood potential. *Water Resources Research*, 36, 2957-2984.
- JARRETT R.D., 1990. Paleohydrologic techniques used to define the spatial occurrence of floods. *Geomorphology*, 3, 181-195.
- JOHNSON R.M., WARBURTON J., 2002. Flooding and geomorphic impacts in a mountain torrent: Raise Beck, Central lake District, England. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, 945-969.
- JONES A.P., SHIMAZU H., OGUCHI T., OKUNO M., TOKUTAKE M., 2001. Late Holocene slackwater deposits on the Nakagawa River, Tochigi Prefecture, Japan. *Geomorphology*, 39, 39-51.
- KALE V.S., MISHRA S., BAKER V.R., 1997. A 2000-year paleoflood record from Sakarghat on Narmada, central India. *Journal of the Geological Society of India*, 50, 283-288.
- KITE J.S., GEBHARDT T.W., SPRINGER G.S., 2002. Slackwater deposits as paleostage indicators in canyon reaches of the central Appalachians: reevaluation

- after the 1996 Cheat River flood. In: "Ancient floods, modern hazards: principles and application of paleoflood hydrology", HOUSE P.K., WEBB R.H., BAKER V.R. and LEVISH D.R. [Eds], Water Science and Application 5, American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 257-266.
- KLAWON J.E., LEVISH D.R., O'CONNELL D.R.H., 2000. Paleofloods and paleosols on the north Platte River. Stratigraphic records of exceedance and nonexceedance. *Geological Society of America, Abstr. Progr.*, 32, A-509.
- KNOX J.C., DANIELS J.M. 2002. Watershed scale and the stratigraphic record of large floods. In: "Ancient floods, modern hazards: principles and application of paleoflood hydrology", HOUSE P.K., WEBB R.H., BAKER V.R. and LEVISH D.R. [Eds], Water Science and Application 5, American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 237-256.
- KNOX J.C., 2000. Sensitivity of modern and Holocene floods to climate change. *Quaternary Science Reviews* 19, 439-457.
- KNOX J.C., 1993. Large increases in flood magnitude in response to modest changes in climate. *Nature*, 361, 430-432.
- KNOX J.C., 1985. Responses of floods to Holocene climatic change in the upper Mississippi Valley. *Quaternary Research*, 23, 287-300.
- KOCHEL R.C., BAKER V.R., 1988. Paleoflood analysis using slackwater deposits. In: "Flood geomorphology", BAKER V.R., KOCHEL R.C. and PATTON P.C. [Eds], pp. 357-376.
- KOCHEL R.C., BAKER V.R., 1982. *Paleoflood Hydrology. Science, New Series*, 215, Issue 4531, 353-361.
- KUTIJA V., 2003. Hydraulic modelling of floods. Paleofloods, Historical data and climatic variability: Applications in flood Risk Assessment (PHEFRA), Colloque international, Barcelone, Espagne, 16-19 octobre 2002, 163-170.
- LAMOTHE M., 1996. Datation par les méthodes de luminescence des feldspaths des milieux sédimentaires : le problème de la remise à zéro. *Géographie physique et Quaternaire*, 50, 365-376.
- LANG M., MOUSSAY D., RECKING A., NAULET R., 2003. Hydraulic modelling of historical floods: a case study on the Ardèche River at Vallon Pont d'Arc. Paleofloods, Historical data and climatic variability: Applications in flood Risk Assessment (PHEFRA), Colloque international, Barcelone, Espagne, 16-19 octobre 2002, 183-190.
- LARONNE J.B., REID I., YITSHAK Y., FROSTICK L.E., 1994. The non-layering of gravel streambeds under ephemeral flood regimes. *Journal of Hydrology*, 159, 353-363.
- LIVINGSTON J.M., SMITH D.G., FROESE D.G., PARKSTROM G.J., PARKER M.K., 2001. Reconstructing the late Holocene (last 3000 years) ice-jam flood history on the middle Yukon River. CANQUA Congress, Whitehorse, TNO, Canada, August, 20-24, 2001.
- MACKLIN M.G., LEWIN J., 2003. River sediments, great floods and centennial-scale Holocene climate change. *Journal of Quaternary Science*, 18, 101-105.
- MACKLIN M.G., LEWIN J., JOHNSTONE E., 2003. Holocene river dynamics and flooding in Great Britain: Evaluating regional responses to climate and land-use change. Third International Paleoflood Workshop (Abstract), Hood River, Oregon, August 1-7, 2003.
- MACKLIN M.G., RUMSBY B.T., HEAP T., 1992. Flood alluviation and entrenchment: Holocene valley-floor development and transformation in the British Uplands. *Geological Society of America Bulletin*, 104, 631-643.
- MANVILLE V., WHITE J.D.L., HOUGHTON B.F., WILSON C.J.N., 1999. Paleohydrology and sedimentology of a post-1.8 ka breakout flood from intracaldera Lake Taupo, North Island, New Zealand. *Geological Society of America Bulletin*, 111, 1435-1447.
- MCCORD V.A.S., 1990. Augmenting flood frequency estimates using flood-scarred trees. Th. Doct., University of Arizona, Tucson, USA, 182 p.
- MCQUEEN K.C., VITEK J.D., CARTER B.J., 1993. Paleoflood analysis of an alluvial channel in the south-central Great Plains: Black Bear Creek, Oklahoma. *Geomorphology*, 8, 131-146.

- MORHANGE C., PROVANSAL L., HESNARD A., BOUIRON M., BOURCIER M., CARBONEL P., WEYDERT P., 1996. Morphogénèse et impacts anthropiques sur les rives du Lacydon à Marseille (6000 av. J.-C.-500 ap. J.-C.). *Annales de Géographie*, 587, 32-46.
- MORIN G., SLIVITZKY M., 1992. Impacts de changements climatiques sur le régime hydrologique: le cas de la rivière Moisie. *Revue des Sciences de l'Eau*, 5, 179-195.
- NEWSON M., LEWIN J., 1991. Climatic change, river flow extremes and fluvial erosion-scenarios for England and Wales. *Progress in Physical Geography*, 15, 1-17.
- O'CONNOR J.E., ELY L.L., WOHL E.E., STEVENS L.E., MELIS T.S., KALE V.S., BAKER V.R. 1994. A 4500-year record of large floods on the Colorado River in the Grand Canyon, Arizona. *Journal of Geology*, 102, 1-9.
- O'CONNOR J.E., WEBB R.H., 1988. Hydraulic modeling for paleoflood analysis. In: "Flood geomorphology", BAKER V.R., KOCHER R.C. and PATTON P.C. [Eds], 383-402.
- O'CONNOR J.E., FULLER J.E., BAKER V.R., 1986. Late Holocene flooding within the Salt River basin, central Arizona. Department of Geosciences paper, University of Arizona, Tucson, 84 pp.
- OSTENAA D.A., O'CONNELL D.R.H., WALTERS R.A., CREED R.J., 2002. Holocene paleoflood hydrology of the Big Lost River, western Idaho. National Engineering and Environmental Laboratory, Idaho. *Geological Society of America Special Paper*, 353, 91-110.
- OUARDA T.B.M.J., RASMUSEN P.F., BOBÉE B., BERNIER J., 1998. Utilisation de l'information historique en analyse hydrologique fréquentielle. *Revue des Sciences de l'Eau*, n° Spécial, 41-49.
- PANAGOULIA-DIONYSIAL M., DIMOU G., 1997. Sensitivity of flood events to global climate change. *Journal of Hydrology*, 191, 208-222.
- PARTRIDGE J.B., BAKER V.R., 1985. Paleoflood hydrology of the Salt River, Arizona. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12, 109-125.
- PASSMORE D.G., MACKLIN M.G., 1994. Provenance of fine-grained alluvium and late Holocene land-use change: The Tyne basin, northern England. *Geomorphology*, 9, 127-142.
- PATTON P.C., 1987. Measuring the rivers of the past: A history of fluvial paleohydrology. *American Geophysical Union*, 55-67.
- PICKUP G., ALLAN G., BAKER V. R., 1988. History, paleochannels and paleofloods of the Fink River, central Australia. In: "Fluvial geomorphology of Australia", WARNER R.F. [Ed], pp. 177-200.
- POESEN J.W.A., HOOKE J.M., 1997. Erosion, flooding and channel management in Mediterranean environments of southern Europe. *Progress in Physical Geography*, 21, 157-199.
- PORAT N., WINTLE A.G., AMIT R., ENZEL Y., 1996. Late Quaternary earthquake chronology from luminescence dating of colluvial and alluvial deposits of the Arava valley, Israel. *Quaternary Research*, 46, 107-117.
- RAAP G.(Jr), HILL C.L., 1998. Geoarchaeology. The earth-science approach to archaeological interpretation. Yale University Press, London.
- RICARD B., BÉGIN Y. 1999. Le développement d'une pessière à épinette blanche et à lichens sur la côte en émergence rapide de la baie d'Hudson au Québec subarctique. *Géographie physique et Quaternaire*, 53, 351-364.
- RIND D., ROSENZWEIG C., GOLDBERG R., 1992. Modelling the hydrological cycle in assessments of climate change. *Nature*, 358, 119-122.
- SAINT-LAURENT D., 2003. Paleoflood hydrology : an emerging science. *Progress in Physical Geography* (accepté).
- SAINT-LAURENT D., LAVOIE L., 2003. Chronology of recent and ancient flood sequences in the Saint-François river, Québec, Canada. Third International Paleoflood Workshop (Abstract), Hood River, Oregon, August 1-7, 2003.
- SAINT-LAURENT D., SAUCET J.-P., 2003. Chronological reconstitution of Floods of the Saint-François Drainage Basin, Québec, Canada. Proceedings 3<sup>rd</sup> Canadian Conference on Geotechnique and Natural Hazards, Edmonton, Alberta, June, 9-10, 2003.
- SAINT-LAURENT D., COUTURE C., MCNEIL É., 2001. Spatio-temporal ana-

- lysis of floods of the Saint-François drainage basin, Québec, Canada. *Environments*, 29, 73-89.
- SERRAT P., DEPRAETERE C., 1997. Incidences de facteurs géomorphologiques dans le fonctionnement d'un bassin en situation de crue : L'exemple de l'Agly (Pyrénées-Orientales). *Géomorphologie : Relief, Processus, Environnement*, 1, 73-88.
- SIGAFOOS R., 1964. Botanical evidence of floods and flood-plain deposition. U.S. Geological Survey Professional Paper, 485A, 35 p.
- SMITH A.M., 1992. Holocene palaeoclimatic trends from palaeoflood analysis. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, (Global and Planetary Change Section)*, 97, 235-240.
- SMITH D.G., FISHER T.G., 1993. Glacial Lake Agassiz : The northwestern outlet and paleoflood. *Geology*, 21, 9-12.
- ST. GEORGE S., NIELSEN E., 2000. Signatures of high-magnitude 19<sup>th</sup> century floods in *Quercus macrocarpa* (Michx.) along the Red River, Manitoba, Canada. *Geology*, 28, 899-902.
- STARKEL L., 1996. Palaeohydrological reconstruction: advantages and disadvantages. In : *"Global continental Changes : The context of palaeohydrology"*, BRANSON, J., BROWN A.G. and GREGORY K.J. [Eds], Geological Society Special Publication, 115, pp. 9-17.
- STEDINGER J.R., SURANI R., THERIVEL R., 1988. Flood Frequency Analysis Package, Version 3.0 and MAX User's Guide. Department of Environmental Engineering, Cornell University, Ithaco, NY, 51 p.
- STEDINGER J.R., COHN T.A., 1986. Flood frequency analysis with historical and paleoflood information. *Water Resources Research*, 22, 785-793.
- STEVENS E.W., 1994. Multilevel model for gage and paleoflood data. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 120, 444-457.
- STUIVER M., REIMER P.J., BARD E., BECK J. W., BURR G.S., HUGHEN K.A., KROMER B., MCCORMAC G., VAN DER PLICHT J., SPURK M., 1998. Intcal98 radiocarbon age calibration, 24,000-0 cal BP. *Radiocarbon*, 40, 1041-1083.
- STUIVER M., REIMER P.J., 1993. Extended <sup>14</sup>C database and revised CALIB radiocarbon calibration program. *Radiocarbon*, 35, 215-230.
- THORSON R.M., 1989. Late quaternary paleofloods along the Porcupine River, Alaska: Implications for regional correlation. *U.S. Geological Survey Circular*, 1026, 51-54.
- WAYTHOMAS C.F., JARRETT R.D., 1994. Flood geomorphology of Arthurs Rock Gulch, Colorado: paleoflood history. *Geomorphology*, 11, 15-40.
- WEBB R.H., JARRETT R.D., 2002. One-dimensional estimation techniques for discharges of paleofloods and historical floods. In: *"Ancient floods, modern hazards: principles and application of paleoflood hydrology"*, HOUSE P.K., WEBB R.H., BAKER V.R. and LEVISH D.R. [Eds], Water Science and Application 5, American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 111-126.
- WEBB R.H., BLAINEY J.B., HYNDMAN D.W., 2002. Paleoflood hydrology of the Paria River, southern Utah and Northern Arizona, U.S.A In: *"Ancient floods, modern hazards: principles and application of paleoflood hydrology"*, HOUSE P.K., WEBB R.H., BAKER V.R. and LEVISH D.R. [Eds], Water Science and Application 5, American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 295-310.
- WEBB R.H., RATHBURN S.L., 1989. Paleoflood hydrologic research in the southwestern United States. *Trans. Resources Research*, 1201, 9-21.
- WEBB R.H., O'CONNOR J.E., BAKER V.R., 1988. Paleohydrological reconstruction of flood frequency on the Escalante River. In: *"Flood geomorphology"*, BAKER V.R., KOCHER V.R. and PATTON P.C. [Eds], pp. 403-418.
- WELLS L.E., 1990. Holocene history of the El Niño phenomenon as recorded in flood sediments of northern coastal Peru, *Geology*, 18, 1134-1137.
- WERRITTY A., PAINE J., ROWAN J., MACDONALD N., MCEWEN L., 2003. Improved estimates of flood risk based on proxy flood series on the lower River Tay, Scotland. Third International Paleoflood Workshop (Abstract), Hood River, Oregon, August 1-7, 2003.

- WOHL E.E., FUERTSCH S.J., BAKER V.R., 1994. Sedimentary records of late Holocene floods along the Fitzroy and Margaret Rivers, western Australia. *Australian Journal of Earth Sciences*, 41, 273-280.
- WOLFE B.B., EDWARDS T.W.D., 2001. Determining flood and climate history of the Peace-Arthabasca delta using a multidisciplinary paleolimnological approach. CANQUA Congress, Whitehorse, TNO, Canada, August, 20-24, 2001.
- YANG D., YU G., XIE Y., ZHAN D., LI Z., 2000. Sedimentary records of large Holocene floods from the middle reaches of the Yellow River, China. *Geomorphology*, 33, 73-88.
- YANOSKY T.M., JARRETT R.D., 2002. Dendrochronologic evidence for the frequency and magnitude of paleofloods. In: "Ancient floods, modern hazards: principles and application of paleoflood hydrology", HOUSE P.K., WEBB R.H., BAKER V.R. and LEVISH D.R. [Eds], Water Science and Application 5, American Geophysical Union, Washington, DC, pp. 77-90.
- ZAWADA P.K., HATTINGH J., 1994. Studies on the palaeoflood hydrology of South African rivers. *Suid-Afrikaanse Tydskrif vir Wetenskap*, 90, 567-568.

**Annexe B : Activités scientifiques liées aux travaux de recherche.**

**Lavoie, L. et Saint-Laurent, D. 2002.** Sols et paléosols des plaines fluviales de la rivière Saint-François. Association Québécoise des spécialistes en Sciences du Sol, 17<sup>ie</sup> Congrès annuel (Résumé & affiche), 9-11 Juin 2003, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada.

**Lavoie, L. et Saint-Laurent, D. 2004.** Reconstitution des plaines fluviales Holocènes et chronologie des inondations majeures dans le bassin de la rivière Saint-François, Québec, Canada. 72<sup>ie</sup> Congrès de l'ACFAS (Résumé & conférence), 10-14 Mai 2004, Université du Québec à Montréal, Montréal, Québec, Canada.

**Lavoie, L. et Saint-Laurent, D. 2004.** Formation des plaines fluviales postglaciaires et géopédologie : secteur centre-sud du Québec, Canada. Association Québécoise pour l'Étude du Quaternaire (AQQUA) et Canadian Geomorphology Research Group (CGRG) (Résumé & affiche), 14-16 Mai 2004, Université Laval, Québec, Québec, Canada.

**Saint-Laurent, D. et Lavoie, L. 2003.** Chronology of recent and ancient flood sequences in the Saint-François river, Québec, Canada. Third International Paleoflood Workshop (Abstract & posters), August 1-7, 2003, Hood River, Oregon, USA.

**Saint-Laurent, D., Lavoie, L. et St-Laurent, J. 2004.** Historique des inondations et variations climatiques : Un exemple du centre-sud du Québec (Canada). In 57th Annual Conference of the Canadian Water Resources Association, Water and Climate change. (Abstracts & posters), June 16-18, 2004, Montréal, Québec, Canada.



**Annexe C** : Directives aux auteurs de la revue *Canadian Journal of Soil Science*.

# RECOMMANDATIONS AUX AUTEURS

Articles publiés dans la *Revue canadienne de la Science du Sol* (révision, janvier 2003).

## INSTRUCTIONS GÉNÉRALE

L'appartenance de l'auteur à l'Institut agricole du Canada ou à une société qui lui est affiliée n'est pas une condition requise. Les communications sont rédigées en anglais ou en français, accompagné d'un résumé en anglais et en français. S'il n'est pas présenté par l'auteur, le résumé sera préparé par la rédaction, à un coût modique pour l'auteur ou pour l'institution dont il relève.

**CONTENU.** Sont acceptés les textes d'intérêt national ou international dans la domaine de la science des sols. Outre les mémoires, nous sollicitons à l'occasion la présentation de mises au point bibliographiques. Les lettres à la rédaction peuvent expliquer, compléter ou commenter les travaux publiés dans la Revue.

**PRÉSENTATION DU MANUSCRIT.** Le manuscrit sera soumis sur support électronique et envoyé, par la poste, à (M. T. Fenton, Institut agricole du Canada, pièce 1112, 141, avenue Laurier Ouest, Ottawa, Ontario, Canada K1P 5J3) ou, par courriel, à (journals@aic.ca). Dans le premier cas, joindre un exemplaire imprimé de l'article à la version électronique. Le manuscrit devrait ne former qu'un fichier dans une version de MS Word ou de WordPerfect quelconque pour micro-ordinateur, tableaux et illustrations étant annexés à la fin. Communiquer en même temps les numéros de téléphone, de télécopieur et de courrier électronique. Les textes faits sur machine de traitement de texte doivent être produits sur imprimante de qualité courrier. Les manuscrits ne doivent pas avoir été simultanément soumis à une autre revue scientifique. Si référence est faite à un article actuellement sous presse, l'auteur doit, en plus de son manuscrit, envoyer deux exemplaires du texte sous presse. L'auteur doit remplir le formulaire de présentation du manuscrit puis le signer. On trouvera le formulaire en question dans le numéro de février de la Revue et sur le site Web ([www.nrc.ca/aic-journals/apssubmit.html](http://www.nrc.ca/aic-journals/apssubmit.html)).

**OPTIONS OUVERTES AUX AUTEURS.** Les auteurs peuvent demander l'évaluation critique de leur manuscrit en «double aveugle», ce qui veut dire que les examinateurs ne connaissent pas le nom du ou des auteurs de l'article présenté. Les auteurs qui veulent se prévaloir de cette option ont charge d'en aviser au préalable la Rédaction et d'étudier avec elle tous les détails afférents. Ils doivent présenter leur manuscrit de façon à en protéger l'anonymat. Le titre de l'article et les noms et adresses des auteurs doivent être remis à la Rédaction sur une page titre distincte.

Les auteurs peuvent également demander le traitement expéditif de leur manuscrit, moyennement toutefois acquittement des frais additionnels encourus par le bureau de rédaction de la Revue (courrier recommandé, évaluation accélérée etc.). Un manuscrit présenté sur disquette et ne requérant qu'un minimum de révision peut ainsi paraître en moins de trois mois après sa présentation. Ce mode de traitement n'amoindrit, cependant en rien la rigueur de l'évaluation, de sorte que la publication d'un article exigeant des révisions importantes risque de s'en trouver reportée. Si elle évite les retards liés à la transmission postale, l'option accélérée ne garantit pas pour autant la publication du manuscrit à échéance ferme. Les auteurs qui recourent à cette option doivent en faire préalablement part à la Rédaction afin d'en établir les coûts. Les frais additionnels sont payables à la présentation du manuscrit. Les auteurs peuvent proposer comme examinateurs éventuels les noms de quelques personnes n'ayant aucun lien avec les travaux de recherche du ou des auteurs ni avec la ou les institutions à laquelle ils sont rattachée. La Rédaction se réserve toutefois le choix définitif, qui inclura vraisemblablement au moins un autre nom que ceux tirés de la liste proposée par les auteurs.

**FRAIS DE PUBLICATION.** Les frais de publication sont de 75\$ par page définitive (format de la Revue), plus le coût des illustrations et des tableaux. Des tirés à part sont offerts à l'auteur à un prix modique qui lui est proposé lors de l'envoi des épreuves. Les retouches excessives apportées aux épreuves sont facturées à l'auteur.

**PROTECTION DES ANIMAUX.** L'auteur doit attester que les animaux d'expérience ont été traités selon des directives équivalentes à celles du Conseil canadien de protection des animaux (Guide d'utilisation des animaux d'expérience, disponible auprès du CCPA, Tower 2, 315-350 Albert St., Ottawa, ON, Canada K1R 1B1).

## LE MANUSCRIT

**RENSEIGNEMENTS GÉNÉRAUX.** Suivre le mode de présentation adopté par la Revue. Pour les communications en anglais, suivre *Scientific Style and Format: The CBE Manual for Authors, Editors and Publishers* (6<sup>e</sup> ed.

1994) disponible auprès du Council of Biology Editors, Inc., Reston, VA 20190-5202 (<http://www.councilscienceeditors.org>). L'orthographe doit se conformer à celle du *Webster's Third New International Dictionary* ou de l'*Oxford English Dictionary*, la même orthographe étant utilisée tout au long d'un même texte. Pour l'orthographe française, on consultera le Dictionnaire Larousse. L'auteur est invité à soumettre son texte à l'examen critique préalable d'un ou de plusieurs collègues.

**MODE DE PRÉSENTATION.** Consulter un numéro récent de la Revue pour avoir une idée de la présentation des Short Communications. Pour les articles originaux, il doit y avoir une page titre distincte, ainsi qu'une page pour les résumés. La page titre ne doit porter que le titre complet et le titre abrégé de la communication, le nom de l'auteur et l'institution ou l'organisme dont il relève. La page du résumé ne contient que le résumé et les mots clés. Le reste du texte est dactylographié sans interruption. Chaque tableau, identifié par un numéro et par un titre, occupera une page distincte. Utiliser du papier à manuscrit à lignes numérotées. Dactylographier à doubles interlignes, y compris pour les tableaux et les légendes.

**TITRE.** Utiliser le titre le plus concis possible, avec des mots descriptifs pour faciliter le retrait de l'information. Le titre doit évoquer les aspects importants de l'article.

**RÉSUMÉ.** Ne doit pas dépasser 200 mots.

**MOTS CLÉS ET TITRE ABRÉGÉ.** L'auteur doit présenter une liste de mots ou de phrases clés. La liste comportera au maximum six mots ou phrases de 2 à 3 mots, extraits du corps de l'article, y compris le nom de l'espèce animale considérée. L'auteur doit également présenter un titre abrégé ne dépassant pas 55 caractères d'imprimerie.

**ORGANISATION DU TEXTE.** La plupart des articles (mémoires) sont divisés en: INTRODUCTION, MATÉRIEL ET MÉTHODES, RÉSULTATS, DISCUSSION, REMERCIEMENTS ET BIBLIOGRAPHIE. Le titre de l'article est fait de lettres majuscules et minuscules. Les titres principaux sont en lettres majuscules, disposés au centre de la page. Les titres secondaires sont disposés comme suite: premiers sous-titres, alignés à gauche sur une ligne distincte, mots principaux en majuscules; deuxièmes sous-titres alignés à gauche, sur la même ligne que le texte, premier mot en majuscules, suivi d'un point; troisièmes sous-titres, alignés à gauche, même ligne que le texte, premier mot en majuscules, soulignés, suivis d'un tiret.

**NOMBRES ET MESURES.** Utiliser des chiffres arabes quand un nombre est suivi d'une unité de mesure normalisée, p. ex., 1 g, 9 j; autrement écrire en toutes lettres les nombres jusqu'à 9 et en chiffres les nombres supérieurs. Voir le *Scientific Style and Format* pour les exceptions autorisées dans une énumération. Les données sont présentées en unités SI (voir tableau des unités SI acceptables dans ce numéro ou dans un numéro récent de la Revue).

**ABBREVIATIONS.** Pour les termes courants, consulter le *Scientific Style and Format*. A leur première présence dans le texte, certains termes peuvent être écrits en toutes lettres, suivis de la forme abrégée.

**NOMS ET TERMES SCIENTIFIQUES OU TECHNIQUES.** Les noms de sol doivent être basés, s'il y a lieu, sur le Système canadien de classification des sols, bien qu'on puisse utiliser aussi d'autres classifications nationales (par exemple américaine) ou internationales. On incite les auteurs à fournir, si l'opportunité s'impose, les noms géographiques ou les coordonnées numériques, de façon à faciliter l'indexation de la publication dans les bases de données internationales. Souligner le nom scientifique des organismes et n'inclure leur patronyme que pour les organismes utilisés dans la recherche en question. Pour les variétés agricoles et horticoles, donner le nom du cultivar. Les guillemets simples ne sont employés dans la description d'un cultivar que si celui-ci suit la désignation botanique. Désigner les espèces végétales et animales par leur nom commun, le nom scientifique au complet, avec patronyme, étant indiqué à la première mention de l'espèce végétale utilisée dans le texte ou dans le résumé. Le nom scientifique complet n'est pas nécessaire pour les espèces courantes d'animaux domestiques. Citer les produits phytosanitaires par leur désignation commune acceptée, et, s'il n'y en a pas, donner le nom chimique complet à la première mention du produit dans le texte.

**STATISTIQUES.** Décrire brièvement et clairement le protocole expérimental. Analyser et résumer les données selon les méthodes statistiques appropriées. L'auteur examinera tout particulièrement la façon dont il utilise les méthodes à comparaisons multiples. Fournir une mesure de variabilité, p. ex. écart-type ou erreur-type, avec les données quantitatives à l'appui (voir Lettre à la Rédaction, *Can. J. Plant Sci.* 60: 325-327). Pour tout renseignement complémentaire, consulter le *Scientific Style and Format*.

**BIBLIOGRAPHIE.** Ne citer que les références les plus pertinentes et éviter les citations multiples. Confronter soigneusement chaque référence avec l'article l'original et en faire mention dans le texte par le nom de l'auteur suivi de l'an-

née de publication. Lorsqu'il y a plus de deux auteurs, inscrire le nom du premier suivi des mots latins «et al.», mais donner les noms complets dans la bibliographie. Inclure dans la bibliographie les articles «sous presse» (nom du périodique et date de parution prévue), mais intégrer au corps du texte les mentions «manuscrits en préparation» les «données inédites» et les «communications personnelles». Pour les abréviations des titres des périodiques, n'utiliser que celles données dans *Biosis* (numéro le plus récent) *List of Serials with Title Abbreviations* (Bioscience Information Service of Biological Abstracts, 2100 Arch Street, Philadelphia, PA 19101-1399).

**TABLEAUX.** Lire soigneusement la partie pertinente du *Scientific Style and Format*. Les affirmations de fiabilité statistique doivent être incluses avec les données quantitatives. Identifier les renvois en bas de page par des lettres en exposant, en caractères gras, dans l'ordre inverse à l'alphabet, en commençant par z: <sup>z</sup>, <sup>z</sup>, <sup>z</sup>, <sup>z</sup>, <sup>z</sup>, etc. Numéroté les tableaux, leur donner un titre bref et les mentionner dans le texte. Les lignes verticales ne sont pas acceptées.

**ILLUSTRATIONS.** Les illustrations du **manuscrit proposé** seront annexées à la fin du fichier texte (les illustrations MS Word ou WordPerfect sont acceptées). Une fois le **manuscrit retenu**, l'auteur fournira une copie papier ou la version électronique des illustrations. Ces dernières seront compatibles avec le logiciel QuarkXpress. Les fichiers à extension \*.tif, \*.bmp, \*.gif, \*.eps, \*.jpg (haute résolution, pour les photographies) sont acceptables, mais pas les fichiers MSWord ou WordPerfect. La résolution devrait suffire pour donner une reproduction nette de l'illustration à l'impression (au moins 150 ppi). Les illustrations devraient tenir sur une colonne, deux colonnes ou une page entière. Les traits seront assez épais (au moins 0.5 point) pour rester clairs à l'impression. Lettrage et symboles auront des dimensions proportionnelles à celles de l'illustration et seront assez gros pour qu'on puisse les réduire sans que la netteté en souffre. Utiliser une police de caractères nette et simple en évitant celles aux caractères trop

déliés, en gamme de gris, qui forment des taches après numérisation et à l'impression. Les mentions seront parallèles aux axes du graphique. L'auteur est prié de respecter les consignes de la revue en ce qui concerne les abréviations, les unités de mesure et le reste. Il est préférable de soumettre des photographies aux dimensions voisines de leur taille définitive. Il s'agira de clichés en noir et blanc bien contrastés. Les photographies en couleurs sont acceptées pourvu que l'auteur défraie le coût de leur reproduction. Prière de communiquer avec le bureau pour connaître la meilleure façon de présenter les illustrations en couleurs.

On identifiera les illustrations au recto, en indiquant au crayon le nom de l'auteur principal et le numéro de la figure. Les illustrations réalisées avec une imprimante à points seront refusées. Les articles sans illustrations de bonne qualité ne seront pas publiés.

**PONCTUATION SPÉCIALE.** Mettre un point après et al. (sans souligner), pas de virgule, entre le ou les noms d'auteur et l'année dans le corps du texte; pas de point après le titre d'un tableau.

**SHORT COMMUNICATIONS.** servent à présenter un bref compte rendu préliminaire sur des découvertes importantes. Elles ne dépassent généralement pas 2000 mots. Elles peuvent comporter des résultats de recherches terminées, mais de portée plutôt restreinte, des descriptions de cultivars, de techniques ou d'appareils nouveaux ou améliorés, appuyé de données de performance. Les *Short Communications* ne comprennent que quelques références bibliographiques (pas plus de neuf). Consulter un numéro récent de la Revue pour le mode de présentation à adopter. Garder les illustrations au minimum, un tableau ou une figure. Le résumé, obligatoire, ne devrait pas dépasser 50 mots.

**BIBLIOGRAPHIE.** Dactylographier les noms de tous les auteurs (majuscules et minuscules), suivis de leurs initiales.

Unités SI acceptables dans les Revues canadiennes de phytotechnie et de science des sols

Mesure	Application	Unité	Symbole ou expression
Dose absorbée	Plantes/animaux	gray par seconde	Gy s <sup>-1</sup>
Superficie	Terres	hectare	ha
	Feuilles	centimètre carré	cm <sup>2</sup>
Concentration	Engrais	kilos par hectare	kg ha <sup>-1</sup>
		microgrammes par gramme	µg g <sup>-1</sup>
	Solutions	grammes par litre ou moles par litre	g L <sup>-1</sup> ou mol L <sup>-1</sup>
Densité	Sol	mégagrammes par mètre cube	Mg m <sup>-3</sup>
Conductivité électrique	Tolérance au sel	décisiemens par mètre	dS m <sup>-1</sup>
Taux d'élongation	Plante	centimètres par jour	cm j <sup>-1</sup>
Production d'éthylène	Fixation de l'azote	nanomoles par plante par seconde	nmol plant <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>
Conductivité hydraulique	Débit de l'eau	mètres par jour	m j <sup>-1</sup>
Taux de croissance	Plantes	grammes par mètre carré par jour	g m <sup>-2</sup> j <sup>-1</sup>
Espace interplanétaire	Structure minérale de l'argile	nanomètre	nm
Échange d'ions	Sol (capacité d'échange de cations)	mmole (+) par kilo	mmol (+) kg <sup>-1</sup>
Transport ionique	Absorption d'ions	moles par kilo par seconde	mol kg <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup>
Longueur	Épaisseur du sol	mètre	m
Lumière	Densité du rayonnement photonique (400-700 nm)	micromiles par mètre carré par seconde	µmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
Photosynthèse	Densité du flux de CO <sub>2</sub>	Milligrammes par mètre carré par seconde	mg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
Pression	Potentiel hydrique	kilopascal	kPa
Radioactivité	Sol, plantes	becquerel	Bq ou s <sup>-1</sup>
Chaleur massique	Stockage de la chaleur	joules par kilo par kelvin	J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>
Température	Sol et plantes	celsius ou kelvin	°C ou K
Volume	Solutions	litre	L
		mètre cube	m <sup>3</sup>
Rendement	Grandes cultures et cultures maraîchères	tonnes par hectare	t ha <sup>-1</sup>
		grammes par mètre carré	g m <sup>-2</sup>
	Masse végétale	grammes par plante ou organe végétal	g plant <sup>-1</sup> ou g grain <sup>-1</sup>

On écrira les unités qui comprennent deux diviseurs avec l'indice négatif (p. ex. kg ha<sup>-1</sup> an<sup>-1</sup>). Le trait oblique (/) devrait servir à l'inscription des unités au long (p. ex. mol/k) où à séparer une mesure physique de l'unité (p. ex. rendement/ha). Choisir les unités pour que le facteur numérique tombe entre 1 et 10 ou 1 et 100, quand on utilise un ou deux chiffres significatifs, respectivement (p. ex. choisir 31,2 mg plutôt que 0,0312 g).

Dans la mesure du possible, éviter l'utilisation du pour cent (%) sauf dans certains cas, par exemple pour cent de la superficie, pour cent de la population, etc.

**Annexe D : Directives aux auteurs de la revue *BELGEO*.**

## PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

BELGEO / Instructions aux auteurs [english] [nederlands]

1. Toute correspondance relative à la revue, ainsi que les propositions d'articles et de comptes rendus sont à adresser à : BELGEO □ Institut de Géographie de l'Université Libre de Bruxelles □ Campus de la Plaine U.L.B., C.P. 246 □ Boulevard du Triomphe - 1050 Bruxelles.
2. Les textes seront fournis sur support papier ainsi que par E-mail (à l'adresse [cvdmotte@ulb.ac.be](mailto:cvdmotte@ulb.ac.be)) ou sur disquette compatible, avec mention du logiciel utilisé. Dans la mesure du possible, les figures seront également livrées sur support informatique.
3. En principe, les textes n'excéderont pas 30.000 caractères.
4. En fin d'article les auteurs indiqueront leur adresse et leur adresse électronique de correspondance.
5. Les titres (en minuscules) seront nettement dégagés et hiérarchisés avec un maximum de trois niveaux, sans numérotation.
6. Si des mots doivent être mis en évidence dans le texte, seul l'italique sera utilisé.
7. Les figures et les photographies, ces dernières limitées au strict minimum, seront numérotées en continu. Les tableaux seront numérotés séparément.
8. La numérotation des notes infrapaginales (à éviter autant que possible) sera également continue ; elles seront reportées en fin d'article.
9. Les références bibliographiques seront libellées comme suit :
  - s'il s'agit d'un article : NOM DE L'AUTEUR et initiale du prénom. (date),

«titre de l'article», titre de la revue, volume, pages, ville d'édition, éditeur;

- s'il s'agit d'un livre : NOM DE L'AUTEUR et initiale du prénom. (date), titre du livre, ville d'édition, éditeur. □ Dans la bibliographie in fine les références seront classées par ordre alphabétique des auteurs et, si plusieurs références au même auteur sont citées, par date. □

10. Dans le corps du texte, tous les noms d'auteurs apparaîtront en minuscules. Les références dans le texte à un article ou à un livre cité dans la bibliographie in fine se limiteront au nom de l'auteur (en minuscules), suivi de la date de la publication et éventuellement de la page entre parenthèses.
11. Les articles pourront être rédigés en français, néerlandais, anglais ou allemand. Ils seront précédés d'un résumé (de 1000 caractères maximum) dans la langue de l'article ainsi que dans une autre langue, de préférence en anglais lorsque l'article n'est pas rédigé dans cette langue, et accompagnés de mots-clés dans les deux langues respectives.
12. Les articles n'engagent que leur auteur.